



unesco

L'ingénierie au service du développement durable

ICEE

International Centre for
Engineering Education
under the auspices of UNESCO

国际工程教育中心
联合国教科文组织支持



中央编译出版社
Central Compilation & Translation Press

Publié en 2021 par l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture, 7, place de Fontenoy, 75352 Paris 07 SP, France

Et le Centre international pour l'enseignement de l'ingénierie (ICEE) sous les auspices de l'UNESCO, porte 417, Wennan Building, Université Tsinghua, District de Haidian, Beijing 100084, République Populaire de Chine et le Central Compilation and Translation Press (CCTP), Part B Hongru Building, #B-5 Chegongzhuang Street, District de Xicheng, Beijing 100044, République Populaire de Chine.

© UNESCO 2021

UNESCO : ISBN 9789232002365

CCTP : ISBN 978-7-5117-4012-0



Cette publication est disponible en libre accès sous la licence Attribution-ShareAlike 3.0 IGO (CC-BY-SA 3.0 IGO) (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/igo/>). En utilisant le contenu de cette publication, les utilisateurs acceptent d'être liés par les conditions d'utilisation des Archives en libre accès de l'UNESCO (<http://www.unesco.org/open-access/terms-use-ccbysa-en>).

Titre original: *Engineering for Sustainable Development*

Publié en 2021 par l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture et le Centre international pour l'enseignement de l'ingénierie (ICEE) sous les auspices de l'UNESCO et le Central Compilation and Translation Press (CCTP).

Les désignations employées dans ce document et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l'UNESCO aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.

Les idées et opinions exprimées dans cette publication sont celles de leurs auteurs ; elles ne reflètent pas nécessairement les vues de l'UNESCO et n'engagent en aucune façon l'Organisation.

Traduction : International Translation Agency Ltd

Relecture : Odette Petit

Graphisme de la couverture : Abracadabra

Conception graphique : Abracadabra et UNESCO/Aurélia Mazoyer

Typeset : UNESCO/Aurélia Mazoyer

Imprimé par l'UNESCO et l'ICEE

Imprimé en France/Chine

L'ingénierie au service du développement durable

- Réaliser les Objectifs de
- développement durable

RÉSUMÉ SUCCINCT

L'ingénierie au service des ODD

Le rapport souligne le rôle crucial de l'ingénierie dans la réalisation de chacun des 17 ODD. Il montre comment l'égalité des chances pour tous est essentielle pour garantir une profession inclusive et équilibrée sur le plan des sexes, qui peut mieux répondre à la pénurie d'ingénieurs pour la mise en œuvre des ODD. Il donne un aperçu des innovations techniques qui façonnent notre monde, en particulier les technologies émergentes telles que les métadonnées et l'Intelligence artificielle, qui sont essentielles pour relever les défis urgents auxquels l'humanité et la planète font face. Il analyse la transformation de l'enseignement des sciences de l'ingénieur et le renforcement des capacités à l'aube de la quatrième révolution industrielle qui permettra aux ingénieurs de relever les défis à venir. Il met en évidence l'effort qui doit être déployé au niveau mondial pour répondre aux besoins spécifiques de chaque région, tout en résumant les tendances de l'ingénierie dans les différentes régions du monde.

En présentant des études de cas et des approches ainsi que les solutions possibles, le rapport révèle en quoi l'ingénierie est cruciale pour le développement durable et en quoi le rôle des ingénieurs est essentiel pour répondre aux besoins humains fondamentaux tels que la réduction de la pauvreté, l'approvisionnement en eau propre et en énergie, la réponse aux catastrophes naturelles, la construction d'infrastructures résilientes et la réduction du fossé qui sépare les pays en termes de développement, entre autres actions, sans laisser personne pour compte.

Nous espérons que le rapport servira de référence aux gouvernements, aux organisations d'ingénieurs, aux universités et aux établissements d'enseignement, ainsi qu'à l'industrie pour forger des partenariats mondiaux et catalyser la collaboration dans le domaine de l'ingénierie afin de réaliser les ODD.

Il est essentiel que
plus de jeunes,
en particulier les **filles**,
envisagent une carrière
d'ingénieur.



unesco

« Les guerres prenant naissance dans l'esprit des hommes et des femmes, c'est dans l'esprit des hommes et des femmes que doivent être élevées les défenses de la paix »

Table des matières

**Avant-propos
de la Directrice Générale de l'UNESCO** 4

**Avant-propos
de l'Académie chinoise d'ingénierie et
l'Université Tsinghua** 7

Remerciements 9

Introduction 10

1.
**L'INGÉNIERIE AU SERVICE D'UN
MONDE PLUS DURABLE** 16

2.
**ÉGALITÉ DES CHANCES
POUR TOUS** 42

2.1 Diversité et inclusion dans l'ingénierie 45

2.2 Les femmes dans l'ingénierie 49

2.3 Les jeunes ingénieurs et leur rôle 53

3.
**INNOVATIONS EN INGÉNIERIE ET
OBJECTIFS DE DÉVELOPPEMENT
DURABLE** 58

3.1 Innovations en ingénierie pour lutter contre
la COVID-19 et améliorer la santé humaine 61

3.2 Ingénierie des ressources en eau pour
le développement durable 69

3.2.1. Eau propre et santé humaine 71

3.2.2. L'hydrologie au service des ODD 77

3.3 Changements climatiques :
une urgence climatique 83

3.4 L'ingénierie : un outil indispensable
à la réduction des risques de catastrophes 89

3.5 Développer des systèmes énergétiques
durables et résilients 94

3.6 Ingénierie minière pour l'avenir 99

3.7 Ingénierie et mégadonnées 104

3.8 Ingénierie et intelligence artificielle 110

3.9 Ingénierie pour des villes intelligentes 115

4.

FORMATION ET RENFORCEMENT DES CAPACITÉS EN INGÉNIERIE POUR LE DÉVELOPPEMENT DURABLE **124**

- 4.1 Enseignement des sciences de l'ingénieur pour l'avenir 127
- 4.2 Apprentissage tout au long de la vie dans le domaine de l'ingénierie : un impératif pour la réalisation des ODD 135
- 4.3 Développement professionnel continu des ingénieurs 142

5.

TENDANCES RÉGIONALES EN MATIÈRE D'INGÉNIERIE **148**

- 5.1 Principales tendances interrégionales 150
- 5.2 Europe et Amérique du Nord 159
- 5.3 Asie et Pacifique 169
- 5.4 Amérique latine et Caraïbes 176
- 5.5 Afrique 182
- 5.6 États arabes 192

Acronymes **198**

Avant-propos

de la Directrice Générale de l'UNESCO

L'ingénierie joue un rôle vital dans la réponse aux besoins humains fondamentaux en améliorant notre qualité de vie et en créant des opportunités pour le développement durable aux niveaux local, national, régional et mondial. Elle apporte également une contribution essentielle aux deux priorités mondiales de l'UNESCO : l'Afrique et l'égalité des genres.

L'ingénierie a un potentiel important, mais nous devons en faire une bien meilleure utilisation, notamment en incluant les filles et les femmes. Les gouvernements du monde entier ont la responsabilité d'offrir des opportunités à tous et d'inciter les jeunes à considérer l'ingénierie comme une vocation et à y envisager une carrière. Ces choix de carrière sont tributaires de l'accès à des programmes d'études de qualité dans les disciplines des STEM (science, technologie, ingénierie et mathématiques), de l'orientation et du mentorat, de l'accès à des informations et une communication utiles, ainsi que du soutien et des programmes de bourses gouvernementaux.

Pour assurer le développement durable en relevant les défis des changements climatiques, de la croissance démographique et de l'urbanisation, des solutions techniques et technologiques innovantes sont nécessaires. Les activités de renforcement des capacités et des compétences en matière d'ingénierie sont essentielles pour garantir qu'il y ait un nombre suffisant d'ingénieurs capables de travailler sur ces problématiques mondiales et prêts à le faire. Cela est particulièrement important en Afrique où le nombre d'ingénieurs par habitant est plus faible que dans d'autres régions du monde. Le Swaziland, par exemple, compte un ingénieur diplômé pour plus de 170 000 personnes, alors que le Royaume-Uni compte un ingénieur diplômé pour 1 100 personnes. Il est essentiel de combler ce déficit de connaissances et c'est l'un des principaux défis auxquels l'ingénierie est confrontée.

Les 17 Objectifs de développement durable ont été conçus pour sensibiliser aux différents aspects de la durabilité, en définissant des cibles spécifiques qui constituent un plan d'action couvrant un large éventail de questions sociales, environnementales et technologiques, allant de la réduction de la pauvreté à la santé pour tous, en passant par le développement des infrastructures, l'éducation, l'égalité des genres, l'utilisation durable des océans, l'énergie, l'eau et l'assainissement. Tous les 17 Objectifs de développement durable ont un lien avec l'ingénierie et la réalisation de chacun d'eux nécessite son concours.

Ce rapport, *L'ingénierie au service du développement durable : Réaliser les Objectifs de développement durable*, présente les différents domaines de l'ingénierie où les ingénieurs peuvent contribuer à la réalisation du Programme 2030 et des ODD. En fournissant des exemples d'innovations et d'actions, ainsi que des recommandations, ce rapport montre la pertinence de la profession d'ingénieur dans la réponse au défi de la durabilité, et comment une éducation inclusive et équitable peut apporter de nouvelles perspectives et ainsi répondre à la pénurie d'ingénieurs, l'un des principaux obstacles à la croissance économique.

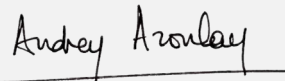
À l'aube de la quatrième révolution industrielle, ce rapport met en lumière les avancées technologiques actuelles en matière d'intelligence artificielle, de mégadonnées et d'Internet des objets, qui modifient notre façon de vivre et d'interagir avec notre espace physique, biologique et numérique. Ces transformations sont visibles dans tous les domaines de l'ingénierie et affectent profondément les systèmes industriels, la production et la gouvernance.

Ce rapport a été finalisé et publié pendant la pandémie mondiale de COVID-19 qui, loin de diminuer la pertinence de l'ingénierie mondiale, a rendu plus pressante la nécessité d'une coopération mondiale pour créer des solutions qui s'attaquent aux causes profondes des problèmes environnementaux chroniques et émergents. La communauté mondiale a réagi à la pandémie avec urgence et efficacité, mais elle risque dans le même temps de priver de ressources les efforts visant à traiter d'autres problèmes urgents, tels que les changements climatiques, la dégradation de l'environnement et l'accès à l'eau propre et à l'énergie.

En outre, la pandémie actuelle a mis à rude épreuve la formation des ingénieurs. Pour former nos meilleurs ingénieurs à relever ces défis mondiaux, il est nécessaire que les jeunes étudient les mathématiques et les sciences dès leur plus jeune âge. Cependant, la pandémie mondiale a entraîné la fermeture d'établissements d'enseignement pour 1,5 milliard d'apprenants dans le monde, soit plus de 90 % de la population scolaire mondiale, avec des conséquences désastreuses pour leur éducation. Face à cette catastrophe dans le domaine de l'éducation, l'UNESCO, en collaboration avec la Coalition mondiale pour l'éducation, s'est efforcée d'assurer la continuité de l'apprentissage, en particulier dans le domaine des sciences.

L'ingénierie a toujours fait partie de l'UNESCO. Telle était la volonté des fondateurs qui, en novembre 1945, ont voulu que le « S » d'UNESCO renvoie à la science et à la technologie. En effet, l'UNESCO a été créée à l'Institut des ingénieurs civils de Londres, la plus ancienne institution d'ingénierie au monde. Au fil des ans, le programme d'ingénierie de l'UNESCO a développé la formation des ingénieurs grâce à ses projets de renforcement des capacités humaines et institutionnelles, en particulier en Afrique, et a lutté contre la sous-représentation des femmes dans l'ingénierie pour combler le déficit des connaissances et promouvoir la coopération interculturelle grâce à son soutien aux organisations internationales d'ingénieurs et aux ONG. En 1968, l'UNESCO a participé à la création de la Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs (FMOI) qui a une voix dans les plus hautes instances gouvernementales et de la politique internationale. Ces dernières années, des initiatives importantes telles que la Journée mondiale de l'ingénierie et la Semaine africaine de l'ingénierie de l'UNESCO ont été mises en place pour célébrer les réalisations des ingénieurs et leurs contributions à la durabilité et à une meilleure qualité de vie pour tous.

Ce rapport, *L'ingénierie au service du développement durable : Réaliser les Objectifs de développement durable*, constitue une étape importante dans le travail normatif de l'UNESCO et je tiens à exprimer ma gratitude à l'équipe de l'UNESCO qui est à l'origine de ce rapport et à nos partenaires, la Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs, l'Académie chinoise d'ingénierie (CAE) et l'Université Tsinghua, ainsi que le Centre international pour l'enseignement de l'ingénierie (ICEE) pour la réalisation de cette importante publication, qui incarne parfaitement l'esprit de coopération dans notre vision commune d'un monde durable.



Mme Audrey Azoulay

Directrice Générale de l'UNESCO

Avant-propos

Académie chinoise d'ingénierie et Université Tsinghua

L'ingénierie, la science et la technologie sont le moteur du développement économique et constituent une source inépuisable pour le progrès de la civilisation humaine.

L'ingénierie a un rôle central à jouer dans le Programme de développement durable à l'horizon 2030, adopté par les Nations Unies en 2015, qui a défini 17 Objectifs de développement durable (ODD), qui constituent un plan d'action mondial pour résoudre les problèmes de développement. L'ingénierie est à la base de tous les 17 ODD et joue un rôle essentiel dans le développement durable. Nous avons la conviction que la publication du rapport de l'UNESCO sur l'ingénierie 2020, *L'ingénierie au service du développement durable : Réaliser les Objectifs de développement durable* contribuera au développement durable et au développement mondial de l'ingénierie pour l'avenir.

À l'heure actuelle, l'ingénierie connaît de profondes transformations et est confrontée à d'immenses défis. En tant que discipline, elle transcende rapidement la création de solutions basées sur des artefacts pour pénétrer les systèmes économiques, écologiques et sociaux. Cette évolution s'inscrit dans un contexte plus large d'accélération progressive des nouvelles découvertes, des nouvelles technologies, de la création de nouveaux matériaux et de nouveaux produits. Dans le même temps, les défis auxquels l'ingénierie est confrontée, y compris ceux résumés dans les ODD, deviennent de plus en plus complexes et exigent souvent des solutions pluridisciplinaires, transnationales et interculturelles. Ces solutions transfrontalières ont joué un rôle inestimable dans la lutte contre la pandémie de COVID-19.

La réalisation des ODD est tributaire de l'innovation dans l'enseignement des sciences de l'ingénieur. La promotion d'un large contingent d'ingénieurs talentueux dotés d'un esprit créatif nécessitera la mise en place d'un enseignement des sciences de l'ingénieur durable et axé sur la créativité. Chaque filière des sciences de l'ingénieur devra assumer la responsabilité de faire de la durabilité une compétence de base afin de cultiver une génération de futurs ingénieurs axés sur l'innovation et la créativité avec un état d'esprit éthique. En effet, nous devons mettre sur pied une profession d'ingénieur et des activités d'ingénierie en phase avec la durabilité et l'innovation. Notre objectif commun doit être d'intégrer l'idée de durabilité dans chaque aspect de l'activité d'ingénierie et de faire de l'ingénierie responsable une valeur commune aux entreprises et aux professionnels de l'ingénierie.

La réalisation des ODD est tributaire du renforcement des partenariats mondiaux dans le domaine de l'ingénierie.

Cependant, à l'heure actuelle, les ressources destinées à l'ingénierie, aux sciences, aux technologies et à l'enseignement des sciences de l'ingénieur ne sont pas équitablement réparties. Les pays et régions en développement, en particulier, manquent d'ingénieurs qualifiés et de ressources en ingénierie. Nous invitons donc instamment la communauté mondiale des ingénieurs à œuvrer à l'instauration d'un monde plus équitable, plus inclusif, plus propice au développement et plus bénéfique pour tous en travaillant en étroite collaboration avec les pouvoirs publics, l'industrie et le milieu universitaire, en renforçant les capacités d'ingénierie dans les régions défavorisées et en relevant les défis mondiaux par la mise en place d'initiatives conjointes.

Le Centre international pour l'enseignement de l'ingénierie (ICEE) a été cofondé par l'Académie chinoise d'ingénierie et l'Université Tsinghua en 2016 sous l'égide de l'UNESCO. La mission de l'ICEE est d'appuyer la réalisation des ODD des Nations Unies par la mise en œuvre, à travers le monde, d'actions coordonnées dans le domaine de l'ingénierie, en particulier de l'enseignement des sciences de l'ingénieur. Cette mission est résumée dans la préparation, l'organisation et la compilation de ce rapport. L'ICEE entend travailler en étroite collaboration et en coopération avec ses homologues internationaux de la communauté internationale des ingénieurs et de l'enseignement des sciences de l'ingénieur pour apporter sa contribution à la réalisation des Objectifs de développement durable des Nations Unies.

Nous espérons que ce rapport de l'UNESCO sur l'ingénierie 2020 aidera les parties prenantes des gouvernements, de l'industrie et du monde universitaire à exprimer la valeur de l'ingénierie, à inspirer des idées pour innover dans le domaine de l'ingénierie et y apporter des améliorations, et à aider à réaliser tout le potentiel de l'ingénierie dans l'intérêt du développement durable de l'humanité et de la planète Terre.



Zhou Ji

Président honoraire du Conseil d'administration de l'Académie chinoise d'ingénierie
Co-président du Conseil consultatif du Centre international pour l'enseignement de l'ingénierie, placé sous l'égide de l'UNESCO (ICEE)

Remerciements

Dix ans après la publication historique du premier rapport sur l'ingénierie de ce type, la communauté des ingénieurs s'est à nouveau réunie pour mettre en lumière le travail de pionnier des ingénieurs qui établissent une nouvelle vision de leur discipline, à un moment où les lignes de fracture des inégalités dans le monde ont été mises en évidence par une pandémie mondiale. Au premier rang de ces inégalités figure la fracture scientifique, technologique et numérique flagrante entre les pays, qui s'avère particulièrement préjudiciable envers les jeunes. Ce deuxième rapport sur l'ingénierie constitue donc un rappel opportun du rôle crucial joué par les ingénieurs et la profession d'ingénieur afin de répondre de manière décisive aux défis urgents et aux nouvelles exigences découlant du Programme de développement durable à l'horizon 2030.

Grâce au partenariat étroit établi entre l'UNESCO, l'Académie chinoise d'ingénierie (CAE), l'Université Tsinghua et la Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs (FMOI), ce deuxième rapport sur l'ingénierie deviendra une référence sur la manière dont elle peut contribuer à la réalisation des Objectifs de développement durable. L'UNESCO remercie vivement leur parrainage enthousiaste et leur précieux soutien dans la réalisation de cette publication importante, sans lesquels ce rapport n'aurait pas vu le jour. Nous remercions tout particulièrement le Centre international pour l'enseignement de l'ingénierie (ICEE) et son équipe d'experts, Zhu Gaofeng, Zhou Ji, Qiu Yong, Wu Qidi, Gong Ke, Yuan Si, Wu Guokai, Wang Sunyu, Kang Jincheng, Qiao Weifeng, Xu Lihui, Fan Xinyan, Tian Qi, Liu Wei, Ji Xue, Li Manli, Zhong Zhou, Xie Zheping, et Wu Fan, pour leur travail sur ce rapport depuis son lancement. L'UNESCO remercie également XuetangX pour le parrainage de ce rapport, ainsi que les institutions, les chercheurs, les professionnels et les experts représentant chaque région du monde pour leur expertise et leurs précieuses contributions.

La conception, le développement et la production du rapport ont été dirigés par un certain nombre d'experts éminents dans le domaine de l'ingénierie. Les membres du Conseil consultatif, coprésidé par Zhou Ji et Tariq Durrani, et les membres du Comité directeur ont fourni des conseils, des idées et une vision inestimables, qui ont jeté les bases du Rapport, pour lesquels l'UNESCO est éminemment reconnaissante.

Nous adressons notre immense gratitude aux auteurs qui, par leur expérience, leurs connaissances et leur expertise, ont mis en évidence le travail des ingénieurs et le rôle clé qu'ils jouent dans la réalisation des Objectifs de développement durable : Gong Ke, Marlene Kanga, Dawn Bonfield, Renetta Tull, Dhinesh Radhakrishnan, Jennifer J. DeBoer, Shankar Krishnan, Ratko Magjarević, José Vieira, Tomás Sancho, Anil Mishra, Will Logan, Yin Chen, Toshio Koike, Abou Amani, Claire Marine Hugon, Darrel J. Danyluk, Soichiro Yasukawa, Sérgio Esperancinha, Jean-Eudes Moncomble, Jürgen Kretschmann, Sudeendra Koushik, Li Pan, George Liu, Paolo Rocca, Jianping Wu, Ajeya Bandyopadhyay,

Anette Kolmos, Soma Chakrabarti, Alfredo Soeiro, Nelson Baker, Jürgen Kretschmann, Eli Haugerud, Yuan Si, Milda Pladaitė, Philippe Pypaert, Jorge Emilio Abramian, José Francisco Sáez, Carlos Mineiro Aires, Yashin Brijmohan, Gertjan van Stam, Martin Manuhwa et Zainab Garashi.

L'UNESCO remercie également les différents auteurs et rédacteurs en chef pour leurs importantes contributions, à savoir Bernard Amadei, Iana Aranda, Hossein Azizpour, Madeline Balaam, Virginia Dignum, Sami Domisch, Anna Felländer, Rob Goodier, Ashley Huderson, Andrew Johnston, Christopher Joseph, Paul Jowitt, Noah Kaiser, Andrew David Lamb, Simone Daniela Langhans, Iolanda Leite, Vladimir López-Bassols, Mariela Machado, Tony Marjoram, David McDonald, Shane McHugh, Michelle Mycoo, Francesco Fuso Nerini, Max Tegmark, Evan Thomas, Ricardo Vinuesa et Sarantuyaa Zandaryaa.

L'équipe de rédaction de l'UNESCO était dirigée par Shamila Nair-Bedouelle, Sous-Directrice générale pour les sciences exactes et naturelles, qui s'est appuyée sur le travail de fond préparé par Gretchen Kalonji et Flavia Schlegel, anciennes Sous-Directrices générales pour les sciences exactes et naturelles, et soutenue par Peggy Oti-Boateng, Rovani Sigamoney, Christine Iskandar, Angelos-Zaid Haïdar, Natalia Tolochko, Ernesto Fernandez Polcuch et Shahbaz Khan. L'ensemble des facettes de l'élaboration du rapport a été facilité et soutenu par Ian Denison et Martin Wickenden, et nous tenons également à souligner le travail de conception graphique d'Abacadabra et des contributeurs aux photographies. Nous remercions particulièrement Aurélia Mazoyer pour son aide précieuse dans la conception et la mise en page du rapport et Cathy Lee, qui a supervisé la réalisation effective du rapport avec aplomb grâce à son attention précise à chaque détail.

Le dernier mot de remerciement est réservé à la formidable équipe spéciale qui a magistralement orienté le rapport tout au long de son élaboration. L'UNESCO tient à exprimer sa profonde gratitude pour le soutien infaillible apporté par la direction de Gong Ke et de son équipe exceptionnelle, Marlene Kanga, José Vieira, Jacques de Mereuil et Théo Bélaud de la Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs pour leurs conseils patients, leurs précieuses critiques et leurs connaissances spécialisées, et pour avoir défendu la cause de la profession d'ingénieur. L'UNESCO souhaite en particulier exprimer son immense gratitude à Gong Ke, qui a dirigé l'équipe d'experts à travers les fuseaux horaires, fourni des conseils pour la mise en place de cette initiative et dont le soutien aux travaux de l'UNESCO dans le domaine de l'ingénierie a été déterminant pour que cette publication prenne forme.

Enfin, l'UNESCO souhaite remercier les milliers d'ingénieurs et la communauté des ingénieurs pour leur travail quotidien dans l'optique de faire progresser l'expertise scientifique et technique, ainsi que pour leur engagement et leur sens du devoir en réponse au Programme de développement durable à l'horizon 2030, qui se traduit dans ce rapport.

Gong Ke¹

Introduction

L'ingénierie au service de la réalisation accélérée des Objectifs de développement durable



¹ Président de la Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs

Un nouveau rapport sur l'ingénierie

L'ingénierie est la théorie et la pratique de la résolution de problèmes. Depuis des milliers d'années, l'ingénierie, en tant que profession et discipline, a su évoluer avec le développement de l'humanité. Grâce à la mise en pratique de connaissances scientifiques, de méthodes techniques et de principes de conception et de gestion, l'ingénierie a contribué à résoudre nos problèmes quotidiens et à répondre à nos besoins de production. En effet, elle a été, avec ses différentes sous-disciplines, l'un des principaux moteurs de la survie de l'humanité sur Terre et de l'amélioration de la qualité de vie. Elle a contribué à notre capacité à survivre aux catastrophes et aux problèmes de santé publique, à assurer la sécurité des aliments et de l'eau, à communiquer et à transporter, ainsi qu'à innover et à créer de nouveaux produits et services. Chaque problème donne lieu à un besoin de solutions dans le domaine de l'ingénierie.

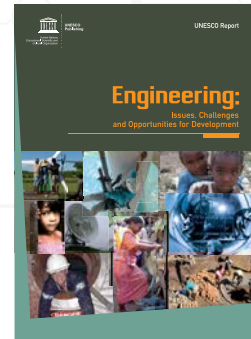
Le plus grand problème auquel le monde est confronté aujourd'hui est le maintien du développement humain tout en veillant à la préservation de la planète. L'ingénierie a un rôle déterminant à jouer à cet égard.

Publié en 2010, le premier rapport sur l'ingénierie, *Engineering : Issues, challenges and opportunities for development* (UNESCO, 2010), a souligné l'importance de la science, de la technologie et de l'ingénierie dans la prise en compte des dimensions économiques, sociales et environnementales du développement humain dans le monde entier dans le contexte des objectifs du Millénaire pour le développement² ; un cadre et une feuille de route des Nations Unies pour le développement durable pour la période 2000-2015.

Le rapport a mis l'accent sur le très grand impact de l'ingénierie et sur le fait qu'il convient de la promouvoir comme « une activité humaine et sociale, mais aussi scientifique, technologique et innovante, dans des contextes sociaux, économiques, et culturels ». Il insistait sur la nécessité :

- de sensibiliser le public et les politiques à l'ingénierie et de leur faire comprendre son rôle en tant que moteur de l'innovation et du développement social et économique ;
- de renforcer les informations en matière d'ingénierie en soulignant le besoin urgent de meilleures statistiques et de meilleurs indicateurs sur l'ingénierie ;
- de moderniser la formation, les programmes et les méthodes d'enseignement en matière d'ingénierie afin de mettre l'accent sur la pertinence d'une approche de l'ingénierie axée sur la résolution de problèmes ;
- d'innover plus efficacement en matière d'ingénierie et de technologie et d'appliquer ces innovations aux problèmes et défis mondiaux tels que la réduction de la pauvreté, le développement durable et les changements climatiques, et développer d'urgence une ingénierie plus écologique et des technologies à faible émission de carbone.

Le premier rapport de l'UNESCO sur l'ingénierie 2010



Depuis la publication du premier rapport sur l'ingénierie, des progrès significatifs ont été réalisés dans le domaine de l'ingénierie à l'échelle mondiale et les contributions majeures des ingénieurs ont permis d'évoluer vers le développement durable. Dans le même temps, il existe des défis toujours plus pressants qui menacent la durabilité de l'humanité et de la planète. Reconnaisant les dimensions sociale, économique et environnementale de ces défis, les dirigeants du monde se sont réunis à l'occasion du 70^e anniversaire des Nations Unies en 2015 pour formuler un nouveau plan d'action pour le développement durable dans une déclaration d'intention figurant dans le document historique intitulé « Transformer notre monde : le Programme de développement durable à l'horizon 2030 » (ONU, 2015).

Ce nouvel agenda représente un projet ambitieux dont le but est de construire un avenir de paix et de prospérité, et une planète saine pour tous les peuples. Il compte 17 objectifs et 169 cibles qui s'appuient sur les Objectifs du Millénaire pour le développement et vise à mobiliser des initiatives concrètes au cours des quinze prochaines années dans des domaines d'une importance primordiale pour l'humanité et la planète. La réalisation des ODD implique l'atténuation du changement climatique et l'adaptation à celui-ci, la construction d'infrastructures résilientes, la garantie de l'approvisionnement alimentaire et de la nutrition, la fourniture d'énergie propre et d'eau potable à des coûts abordables, la conservation et la restauration de la biodiversité sur terre et sous l'eau, et bien plus encore. Les solutions d'ingénierie innovantes seront d'une importance vitale et les ingénieurs devront plus que jamais assumer plus de responsabilités.

Ce deuxième rapport sur l'ingénierie, publié par l'UNESCO dix ans après le premier, réaffirme l'importance de l'ingénierie dans ses efforts pour répondre aux défis et attentes soulevés par l'Agenda 2030 des Nations Unies pour le développement durable. Il rassemble les voix des ingénieurs qui ont répondu à l'appel à la création et à la mise en œuvre de solutions visant à traiter les questions de durabilité qui touchent tous les aspects de notre vie, et fait ainsi de l'ingénierie un élément crucial pour bâtir un monde plus durable.

² Pour plus d'informations sur les objectifs du Millénaire pour le développement : <https://www.un.org/fr/millenniumgoals>

La pandémie de COVID-19 a précipité l'appel à une action urgente en vue de concrétiser les ODD, tout en confirmant la nécessité de l'ingénierie dans le cadre du développement durable

L'ingénierie au service du développement durable a été parachévé et publié alors que le monde entier était en pleine pandémie de COVID-19. Cette pandémie mortelle a révélé l'urgence et l'importance d'innovations dans les domaines de la science, de la technologie et de l'ingénierie pour les nouveaux défis à venir, alors que les ingénieurs cherchent à créer des solutions en vue de la réalisation des ODD afin de rendre notre monde plus résilient, inclusif et durable.

La COVID-19 a déclenché une crise sanitaire, économique et sociale sans précédent, qui menace les vies et les moyens de subsistance de toute l'humanité, sans distinction de nationalité, de race, de sexe ou de statut social et économique. La réponse collective dans le monde entier illustre le potentiel de solidarité et d'entraide. Toutefois, les effets sur la santé publique et les conséquences économiques de cette pandémie ne sont pas ressentis de la même manière dans les différents pays et parmi les différents groupes de personnes en raison des inégalités historiques dans leurs conditions économiques, sociales et environnementales. Le *Rapport sur les objectifs de développement durable 2020* a établi le constat selon lequel la pandémie « a mis au jour et exacerbé les inégalités et injustices existantes » (ONU, 2020). Il poursuit en affirmant que « [D]ans les économies avancées, les taux de mortalité les plus élevés ont été enregistrés dans les groupes marginalisés. Dans les pays en développement, les personnes les plus vulnérables, notamment les personnes employées dans l'économie informelle, les personnes âgées, les enfants, les personnes handicapées, les peuples autochtones et les migrants, risquent d'être encore plus durement frappés » (DESA, 2020).

Le *Rapport sur les objectifs de développement durable 2020* a analysé l'impact de la COVID-19 sur chaque ODD et, en juin 2020, a révélé que les moyens de subsistance de la moitié de la population active mondiale ont été gravement compromis et que des dizaines de millions de personnes replongent dans l'extrême pauvreté et la faim, réduisant à néant les modestes progrès réalisés ces dernières années. Au moment de la rédaction de ce document (4 février 2021), plus de 100 millions de personnes dans le monde ont été infectées, le nombre de décès dépasse les 2,3 millions, et ce chiffre continue d'augmenter, aucun pays n'étant épargné. Cette crise est un signal d'alerte quant à l'urgence de la réalisation des ODD, comme l'a souligné le Secrétaire général de l'ONU, António Guterres, dans son avant-propos au rapport d'étape de l'ONU : « Loin de compromettre les arguments en faveur des ODD, les causes profondes et les conséquences inégales de la COVID-19 démontrent précisément pourquoi nous avons besoin du Programme de développement durable à l'horizon 2030, de l'Accord de Paris sur les changements climatiques et du Programme d'action d'Addis-Abeba, et soulignent

l'urgence de leur mise en œuvre. J'ai donc sans cesse appelé à une action et à un effort de redressement coordonnés et globaux à l'échelle internationale, fondés sur des données scientifiques solides et guidés par les Objectifs de développement durable. »

L'ingénierie se doit de jouer un rôle plus dynamique dans la lutte contre la COVID-19 et dans la poursuite d'une reprise véritablement transformatrice afin de mieux reconstruire. Les ingénieurs peuvent travailler de concert avec d'autres professionnels dans les pays et les communautés pour identifier et éliminer les causes sous-jacentes de la pauvreté mondiale persistante, améliorant ainsi les conditions de vie des populations et leurs environnements, et mettant en œuvre les recommandations du présent rapport afin d'accélérer les initiatives en matière d'ingénierie pratique en vue de la réalisation des ODD.

Comprendre le rôle de l'ingénierie dans la réalisation des ODD

La science, la technologie et l'ingénierie sont au cœur du développement durable. Comme l'a souligné le Secrétaire général des Nations Unies, António Guterres, dans sa lettre de félicitations adressée au Congrès mondial de l'ingénierie au moment où il célébrait le 50^e anniversaire de la Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs (FMOI) en 2018, « nous nous efforçons de réaliser les 17 Objectifs de développement durable, qui constituent le projet mondial pour construire un avenir de paix et de prospérité pour tous, sur une planète saine. Chacun de ces objectifs exige des solutions ancrées dans la science, la technologie et l'ingénierie » (Guterres, 2018). En 2019, sous l'impulsion de la FMOI ainsi que d'autres partenaires de l'UNESCO dans le domaine de l'ingénierie et de plus de 75 institutions, la 40^e Conférence générale de l'UNESCO a proclamé à l'unanimité le 4 mars comme la Journée mondiale de l'ingénierie pour le développement durable³. Il s'agit d'une reconnaissance mondiale du rôle crucial de l'ingénierie pour la réalisation des ODD et d'une occasion unique de souligner le rôle des ingénieurs et de l'ingénierie, et de promouvoir des solutions visant à faire progresser la réalisation des ODD.

Il est important de reconnaître le rôle de la science, de la technologie et de l'ingénierie pour la réalisation des ODD, car ce sont elles qui établissent les bases concrètes, anticipent les conséquences futures et contribuent à trouver des voies innovantes visant à enclencher les transformations pour la durabilité. Elles sont le levier d'une réalisation intégrée des ODD. Parallèlement, le public doit impérativement être sensibilisé au rôle de l'ingénierie au service des ODD par le biais de la Journée mondiale de l'ingénierie pour le développement durable, car l'ingénierie permet d'appliquer les connaissances scientifiques, les méthodes techniques et les principes de conception à la pratique de la résolution des problèmes qui entravent le développement durable, et d'assurer le bien-être de tous les peuples et la santé de la planète.

3 Pour plus d'informations sur la Journée mondiale de l'ingénierie pour le développement durable, consulter <https://fr.unesco.org/commemorations/engineering>

Le chapitre 1 du présent rapport, intitulé « L'ingénierie au service d'un monde plus durable », explique le rôle clé que joue l'ingénierie dans le processus de transformation du monde, et fait un bref rappel historique pour montrer comment l'ingénierie et ses praticiens, les ingénieurs, ont changé le monde depuis des millénaires, depuis l'invention des premiers outils en pierre et de dispositifs simples comme la poulie et le levier dans l'Antiquité, jusqu'à l'application des techniques d'intelligence artificielle (IA) les plus avancées et de la technologie du génie biomédical pour améliorer la vie et la production des populations. Une analyse approfondie des fonctions potentielles de l'ingénierie associées à chacun des 17 ODD démontre de manière tangible le rôle indispensable que l'ingénierie et les ingénieurs jouent dans la réalisation de chaque ODD d'ici à 2030. Le chapitre indique également les écarts entre les capacités actuelles en matière d'ingénierie et les exigences pour la réalisation des ODD, et appelle à une synergie étroite entre le gouvernement, l'industrie, les instituts d'éducation et de recherche, la société civile et la communauté des ingénieurs pour une solide implication dans le développement de l'ingénierie.

Sur la même lancée, les ingénieurs en tant que communauté et individuellement, inspirés et guidés par le Programme de développement durable à l'horizon 2030, doivent faire preuve d'une compréhension plus claire de leurs rôles et responsabilités dans la réalisation des ODD. Les communautés d'ingénieurs du monde entier doivent s'approprier la mission ultime de l'ingénierie et des ingénieurs aujourd'hui dans le cadre de la réalisation des ODD afin de contribuer à façonner un avenir durable pour l'humanité et la planète, et de mettre en œuvre des pratiques d'ingénierie plus durables, innovantes, inclusives, respectueuses de l'environnement et plus sûres, tout en atteignant un niveau net de zéro émission de carbone.

L'ingénierie elle-même doit évoluer en une pratique plus innovante, plus inclusive, plus coopérative et plus responsable

La réalisation des ODD nécessite que le domaine de l'ingénierie subisse lui-même des réformes transformatrices dans le monde entier pour relever les défis multiformes auxquels l'humanité est confrontée et qu'aucun pays ne peut relever seul. Le Programme 2030 déclare que « [N]ous sommes déterminés à mobiliser les moyens nécessaires à la mise en œuvre de ce Programme grâce à un Partenariat mondial revitalisé pour le développement durable, qui sera mû par un esprit de solidarité renforcé, où l'accent sera mis sur les besoins des plus démunis et des plus vulnérables, et auquel participeront tous les pays, toutes les parties prenantes et tous les peuples » (ONU, 2015). Il en va de même pour les partenariats au sein de la communauté des ingénieurs du monde entier et avec toutes les parties prenantes telles que les gouvernements et les décideurs politiques, les universités et les éducateurs, l'industrie et les fondations, et les sociétés civiles. Le rapport souligne

l'importance cruciale des partenariats mondiaux entre les communautés d'ingénieurs, et met en évidence le besoin essentiel de renforcer les capacités dans les pays en développement.

Le chapitre 2, « Égalité des chances pour tous », explique en quoi la diversité et l'intégration dans le milieu de l'ingénierie sont essentielles pour garantir qu'un nombre suffisant d'ingénieurs, représentant différents points de vue et milieux, soit attiré par la profession d'ingénieur. Des ingénieurs aux compétences diversifiées sont en mesure de répondre plus efficacement aux ODD en proposant des solutions créatives et pertinentes pour tous, tout en veillant à ce que les futures solutions d'ingénierie soient exemptes de tout préjugé et de toute discrimination et en luttant contre l'injustice sociale. Il donne une vue d'ensemble de cette question en mettant l'accent sur les femmes et les jeunes ingénieurs. Bien que des progrès significatifs aient été réalisés, grâce aux efforts conjugués des organisations d'ingénieurs, des gouvernements et des établissements d'enseignement, entre autres, le processus demeure déséquilibré. Il reste encore beaucoup à faire pour améliorer davantage la diversité et l'inclusion dans la profession d'ingénieur. Une démarche plus interdisciplinaire, avec en filigrane un climat plus inclusif, est essentielle pour réaliser cette ambition. La communauté des ingénieurs doit encore renforcer ses liens de collaboration avec de multiples secteurs de la société pour relever les défis des ODD d'une manière plus équilibrée et plus globale, tout en veillant à un équilibre des progrès réalisés simultanément par objectif.

Des solutions d'ingénierie innovantes sont nécessaires pour résoudre les problèmes de non-durabilité et transformer notre monde. Certes l'éventail des applications de l'ingénierie est vaste, mais le chapitre 3 « Innovations en ingénierie et Objectifs de développement durable » présente quelques-uns des nombreux domaines d'application de l'ingénierie qui montrent comment les innovations techniques développées grâce aux technologies émergentes peuvent contribuer à la réalisation des ODD. Il démontre de façon plus concrète différents rôles que l'ingénierie peut jouer pour la réalisation des ODD et révèle les écarts entre les capacités techniques actuelles et celles nécessaires pour réaliser les ODD. L'investissement et la collaboration dans la recherche-développement en ingénierie dans le contexte de la quatrième révolution industrielle (Schwab, 2017) constituent la voie à suivre pour relever les défis toujours plus pressants que sont le bien-être et la santé des personnes, l'accès à l'eau propre et la sécurité alimentaire (pour une population en pleine croissance), l'urgence climatique, la décarbonisation des ressources énergétiques, la gestion des risques de catastrophe, la biodiversité, le développement urbain et d'autres défis vitaux.

La formation et le renforcement des capacités en ingénierie sont essentiels à la réalisation des ODD à travers l'ingénierie

La formation et le renforcement des capacités en ingénierie sont abordés au chapitre 4 du présent rapport intitulé « Formation et renforcement des capacités en ingénierie pour le développement durable ». Il explique en quoi la formation en ingénierie est fondamentale pour renforcer les capacités en ingénierie et pour répondre à la demande d'ingénieurs dans le monde entier, tant en termes de quantité que de qualité. Il est important de noter que le renforcement des capacités en ingénierie est un processus continu, qui commence à l'école, se poursuit dans l'enseignement supérieur avec des programmes formels, puis se prolonge tout au long de la carrière professionnelle d'un ingénieur, d'un technologue ou d'un technicien dans une optique de développement professionnel continu afin de répondre à la croissance rapide des connaissances et des compétences correspondantes.

La formation des ingénieurs pour la mise en œuvre des ODD requiert non seulement de nouvelles compétences en matière d'apprentissage et de réflexion axés sur la création, de résolution de problèmes complexes, de coopération interdisciplinaire et internationale et d'attitude éthique, mais également une réforme de l'enseignement des sciences de l'ingénieur, allant d'une démarche théorique basée sur les connaissances techniques académiques à une approche interdisciplinaire beaucoup plus large de l'apprentissage, et d'une approche centrée sur l'enseignant à une approche plus centrée sur l'apprenant et axée sur les problèmes. Il faudra mettre en place une approche structurée, avec l'assurance qualité et l'accréditation requises, afin de promouvoir l'apprentissage tout au long de la vie et le développement professionnel. Des examens périodiques des attributs et des compétences professionnelles des diplômés impliquant de multiples parties prenantes aideront à orienter la formation des ingénieurs afin de répondre à l'évolution des exigences du développement durable. En outre, un système mondial d'accréditation est nécessaire pour aider à garantir la qualité des ingénieurs dans le cadre de l'application des ODD et leur permettre d'exercer au-delà des frontières nationales.

Encourager le développement de l'ingénierie par les efforts conjoints des gouvernements, des milieux universitaires, de l'industrie, des organisations d'ingénieurs et de la société civile

Dans le cadre du Programme de développement durable à l'horizon 2030, les ingénieurs du monde entier ont déployé

des efforts considérables pour promouvoir les ODD et renforcer les capacités en matière d'ingénierie pour les ODD. Le chapitre 5 de ce rapport, intitulé « Tendances régionales en matière d'ingénierie », présente un aperçu des domaines dans lesquels la coopération interrégionale a facilité la progression de chaque région vers la réalisation des ODD. Il démontre en quoi l'ingénierie est effectivement un catalyseur du développement régional et du partenariat interrégional en vue de « renforcer l'accès à la science, à la technologie et à l'innovation et la coopération Nord-Sud et Sud-Sud et la coopération triangulaire régionale et internationale dans ces domaines et améliorer le partage des savoirs selon des modalités arrêtées d'un commun accord, notamment en coordonnant mieux les mécanismes existants », et « apporter, à l'échelon international, un soutien accru pour assurer le renforcement efficace et ciblé des capacités des pays en développement et appuyer ainsi les plans nationaux visant à atteindre tous les Objectifs de développement durable, notamment dans le cadre de la coopération Nord-Sud et Sud-Sud et de la coopération triangulaire » (ONU, 2015). Le projet UNESCO-FMOI de la Semaine africaine de l'ingénierie⁴ mené par la Fédération des organisations africaines d'ingénieurs (FAEO), et le projet Africa Catalyst (Africa Catalyst, 2014) soutenu par l'Académie royale d'ingénierie (RAEng) et la FMOI, sont de bons exemples de mise en œuvre de l'ODD 17 : partenariats pour la réalisation des objectifs.

Toutefois, des écarts importants subsistent entre les progrès réalisés et ceux attendus par le Programme 2030, que les États membres des Nations Unies se sont engagés à respecter. Un examen de ces écarts indique que leur principal facteur est le manque de capacités d'ingénierie, ainsi que de coopération internationale, interdisciplinaire et intersectorielle pour le développement du secteur de l'ingénierie, parmi de nombreuses autres causes.

Dans son projet de réalisation des ODD d'ici à 2030, le monde est confronté à une longue série de défis dont le plus grave est le déséquilibre en matière de développement entre les différentes régions. Ce constat ne fait que souligner davantage la nécessité d'un partenariat mondial pour le renforcement des capacités en matière d'ingénierie, en particulier dans les pays en développement. Le présent rapport reconnaît les difficultés auxquelles est confronté le développement du secteur de l'ingénierie dans le monde entier et dans les différentes régions. Il propose à cet effet une série de recommandations aux gouvernements, à l'industrie, aux universités, aux établissements d'enseignement, ainsi qu'à la société civile, en guise de marche à suivre. En résumé, le rapport appelle toutes les parties prenantes à prendre conscience du rôle essentiel de l'ingénierie pour les ODD, à reconnaître les demandes urgentes en matière d'ingénierie et à se donner la main pour favoriser le développement de l'ingénierie par l'investissement et la coopération dans chaque pays, dans chaque région et dans le monde entier, afin de faire de l'ingénierie un véritable catalyseur, régulateur et accélérateur pour la réalisation des ODD.

4 Pour plus d'informations sur la Semaine africaine de l'ingénierie : <http://www.wfeo.org/wfeo-in-africa>

Références

- Africa Catalyst. 2014. Africa Catalyst. Building engineering capacity to underpin Human and Economic Development in Africa. Concept Note. <http://africacatalyst.org>
- DESA. 2020. *Rapport sur les objectifs de développement durable 2020*. Département des affaires économiques et sociales. https://unstats.un.org/sdgs/report/2020/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2020_French.pdf
- Guterres, A. 2018. Welcome statement from UN Secretary General António Guterres. Global Engineering Congress, 22 octobre. <https://www.ice.org.uk/events/global-engineering-congress-day-one>
- ONU. 2015. *Transformer notre monde : le Programme de développement durable à l'horizon 2030*. New York, Organisation des Nations Unies. https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=F
- ONU. 2020. UN report finds COVID-19 is reversing decades of progress on poverty, healthcare and education. UN News, 7 juillet. <https://www.un.org/development/desa/en/news/sustainable/sustainable-development-goals-report-2020.html>
- Schwab, K. 2017. *La quatrième révolution industrielle*. Londres, Penguin Books Limited.
- UNESCO. 2010. *Engineering: Issues, challenges and opportunities for development*. Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture. Paris, Éditions UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000189753>

Marlene Kanga¹

1. L'INGÉNIERIE AU SERVICE D'UN MONDE PLUS DURABLE

1 Présidente de la Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs (de 2017 à 2019).





Résumé. Les ingénieurs ont eu un rôle important dans la transformation du monde par le biais d'inventions et du développement de nouvelles technologies qui ont eu un impact considérable sur la croissance économique et la qualité de vie. Les Objectifs de développement durable (ODD) des Nations Unies visent à adopter une approche intégrée du développement, qui répond aux besoins de tous en appelant à des opportunités et à une prospérité économiques équitables pour tous, et en réduisant les effets délétères sur la planète. L'ingénierie est fondamentale pour permettre d'atteindre les 17 Objectifs, comme l'indique le tableau 1. La demande en ingénieurs dans le monde est élevée, tant dans les pays développés dans les domaines des hautes technologies, des logiciels, de l'intelligence artificielle et des communications, que dans les pays en développement dans les domaines des infrastructures de base pour les villes, des systèmes de transport, et des réseaux d'approvisionnement en énergie et en eau. Il est également crucial pour l'enseignement de l'ingénierie de répondre aux besoins actuels et futurs des employeurs. Le gouvernement, les enseignants de l'ingénierie et les établissements professionnels d'ingénierie doivent collaborer pour veiller à ce que les normes d'enseignement de l'ingénierie tiennent compte des ODD et que plus de jeunes, surtout de filles, envisagent une carrière dans l'ingénierie.

Bâtir notre monde

Les ingénieurs innovent et transforment le monde depuis des siècles. Depuis l'invention des premiers outils en pierre aux simples appareils comme la poulie et le levier, ils ont permis à la population de soulever et de déplacer des objets dont le poids ne pourrait être supporté par une seule personne. Le mot « ingénieur » vient du latin *ingenium*, qui est également à l'origine du mot « ingéniosité » et

renvoie à des qualités innées, en particulier à une agilité mentale. Les ingénieurs sont, depuis des millénaires, reconnus comme des personnes capables de trouver des solutions à des problèmes du quotidien, à l'aide des sciences, des mathématiques et de leur ingéniosité pour faire ce qui n'a jamais été fait, d'aller là où personne n'est jamais allé, et de réaliser ce qui semblait impossible.

L'ingénierie est véritablement une profession remarquable, extraordinaire, qui englobe de nombreuses disciplines, dont certaines sont très anciennes, comme les prouesses de l'ingénierie militaire, civile, mécanique, électrique, électronique, chimique, et certaines sont plus récentes ou émergentes, notamment l'ingénierie environnementale, mécatronique (mécanique et électronique), biomédicale, biochimique, et d'autres disciplines qu'il reste à nommer. L'apparition de ces nouvelles disciplines est une caractéristique clé de l'ingénierie, qui repousse sans cesse les frontières des progrès grâce à l'ingéniosité et à l'intelligence².

Des preuves de l'impact remarquable de l'ingénierie peuvent être constatées dans les sites datant de l'Antiquité. L'Acropole et le Parthénon en Grèce, le Colisée romain, les pyramides d'Égypte et les villes et pyramides des Empires maya, inca et aztèque sont tous des preuves de l'ingéniosité des ingénieurs. Les ingénieurs civils et militaires ont construit les aqueducs et routes romains, tels que la Via Appia, et la Grande Muraille de Chine, qui servait aux ambitions politiques et militaires des dirigeants. Des villes destinées à la population ordinaire ont été bâties dans la vallée de l'Indus dans les années 2600 avant J.-C. et dans le delta du Nil (3300 à 2600 avant J.-C.), constituées de quadrillages rectangulaires de rues, de grands bâtiments et de bains publics. L'ingénierie a soutenu le pouvoir politique, militaire et économique.

La première révolution industrielle, qui a eu lieu au dix-huitième siècle en Europe et au Royaume-Uni, s'est accompagnée d'inventions telles que la machine à vapeur, ce qui a refaçonné le monde en provoquant des améliorations remarquables dans la productivité pour les personnes ayant eu les moyens et la détermination nécessaires pour les mettre en œuvre. Les avancées technologiques de la deuxième révolution industrielle aux dix-neuvième et vingtième siècles provenaient des progrès dans la génération d'électricité, et de travaux d'ingénierie civile tels que l'approvisionnement en eau et les réseaux d'assainissement, et enfin la construction des routes et des ponts qui ont marqué la naissance de l'ingénierie en tant que profession. Ces innovations ont transformé les pays, de l'agriculture à l'économie industrielle, ce qui a augmenté les revenus et renforcé la prospérité, surtout en Europe et en Amérique du Nord. La troisième révolution industrielle a suivi au cours de la seconde moitié du vingtième

² Le premier rapport de l'UNESCO sur l'ingénierie définit l'ingénierie comme « le domaine ou la discipline, pratique, profession et art qui se rapporte au développement, à l'acquisition et à l'application de connaissances techniques, scientifiques et mathématiques concernant la compréhension, la conception, le développement, l'invention, l'innovation et l'utilisation de matériaux, machines, structures, systèmes et procédés à des fins précises ». Le rapport explorait les disciplines d'ingénierie majeures établies qui prévalaient il y a dix ans et les besoins pressants de l'ingénierie. Peu de choses ont changé depuis lors, à l'exception du fait que les besoins se sont fait plus pressants, que de nouvelles disciplines de l'ingénierie sont apparues, et que la société demande davantage aux ingénieurs, dans le contexte du développement durable, de répondre aux besoins de base de tous, tout en protégeant la planète et en garantissant la prospérité de toutes les personnes (UNESCO, 2010).

siècle et a été motivée par les progrès réalisés dans les sciences et les technologies de l'information : l'ère de l'information.

La créativité des ingénieurs a changé le monde, car elle a influé sur la qualité de vie des personnes de presque toutes les parties du monde. Le monde est maintenant à l'aube de la quatrième révolution industrielle, lors de laquelle les données et l'interconnectivité des machines et de l'Internet des objets entraîneront des gains en efficacité et des innovations. L'ingénierie reste au cœur de cette révolution, car elle entraîne des innovations et avancées scientifiques qui transforment de nouvelles idées en inventions et produits. Les ingénieurs continuent de faire ce qu'ils ont toujours fait : utiliser les sciences, les mathématiques et leurs compétences intellectuelles hautement spécialisées pour transformer le monde. La différence, c'est que le rythme du changement s'accélère au point que les avancées technologiques totales au cours des cent dernières années ont dépassé celles des derniers milliers d'années.

Le travail des ingénieurs, ce n'est pas seulement de façonner des villes et des industries : c'est également de transformer les interactions sociales et politiques grâce à des avancées dans l'informatique et les communications. Les trente dernières années ont été témoins d'une croissance rapide de l'utilisation des ordinateurs et de nouvelles technologies de communication. L'invention du smartphone en 2007 a modifié les comportements sociaux. De nos jours, les jeunes ne peuvent tout simplement pas imaginer leur vie sans smartphone. La technologie a également entraîné des changements sociaux et politiques. Par exemple, les réseaux sociaux ont provoqué la révolte du Printemps arabe au Moyen-Orient en 2012 (Beaumont, 2011) et le bouleversement politique en Malaisie en 2017 (Abdullag et Anuar, 2018). Dans de nombreux pays, les réseaux sociaux jouent un rôle clé dans les élections, impliquant les jeunes comme jamais auparavant, une avancée qui n'aurait jamais été possible sans l'accessibilité extraordinaire qu'ont permise les télécommunications mobiles (Newkirk, 2017).

Les effets positifs importants de l'ingénierie sont visibles dans les produits, la productivité et la croissance, et les capacités d'innovation des économies (Maloney et Caicedo, 2016). Les ingénieurs jouent un rôle fondamental dans l'appui à la croissance et au développement d'infrastructures essentielles telles que les routes, les ponts ferroviaires, les barrages, les communications, la gestion des déchets, l'approvisionnement en eau et l'assainissement, l'énergie et les infrastructures numériques facilitant les communications. Ils permettent à l'économie d'un pays d'évoluer et de se développer, ce qui, à son tour, entraîne de meilleurs résultats économiques et sociaux, notamment une meilleure espérance de vie, des taux plus élevés d'alphabétisation et une meilleure qualité de vie.

Les pays du monde prennent maintenant conscience du fait que l'ingénierie, les sciences et la technologie permettent la croissance économique, et qu'une économie moderne est impossible sans ingénierie. Cinq tendances majeures ont un impact sur le monde d'aujourd'hui : la rapide urbanisation et le développement des grandes villes ; les changements de pouvoir économique mondial ; les changements climatiques, les changements démographiques et les populations vieillissantes dans les régions développées ; les innovations technologiques et le renforcement d'une culture d'entrepreneuriat. Ces tendances entraînent la reconnaissance du lien important entre les capacités d'ingénierie d'un pays (le nombre d'ingénieurs et leur « qualité ») et son développement économique.

Les ingénieurs et les innovations en ingénierie ont été au premier rang des actions de gestion des impacts et de propagation de la COVID-19, et de l'utilisation de technologies innovantes dans la détection, le suivi et la lutte contre la propagation du coronavirus. Les capteurs et l'intelligence artificielle sont utilisés pour contrôler la température des personnes qui entrent dans des établissements importants, étant donné que la fièvre est un indicateur important du virus. Les capteurs surveillent les eaux usées afin de repérer les traces du virus dans les zones urbaines. L'intelligence artificielle est utilisée pour l'analyse rapide des performances d'éventuels vaccins et approches thérapeutiques, et la fabrication en 3D pour la production d'écrans faciaux et autres équipements de protection individuelle ainsi que des ventilateurs et des équipements médicaux très demandés. Les communications mobiles sont utilisées pour suivre et localiser les personnes pouvant être porteuses du virus. De plus, les communications ont également facilité l'apprentissage en ligne pour des millions de jeunes dans le monde et à des personnes travaillant à domicile, en raison du confinement instauré à l'échelle mondiale (FMOI, 2020a).

Dans le monde post-COVID-19, les ingénieurs et l'ingénierie seront donc plus que jamais reconnus comme le centre du monde moderne et la principale force motrice dont les pays ont besoin afin de développer leurs économies dans les domaines de l'éducation, de la santé, du transport, du logement, des villes intelligentes et des industries, tous des créateurs d'emplois pour chacun.

La croissance démographique et l'urbanisation sont des domaines clés qui motivent la demande en ingénieurs. Plus de 50 % de la population mondiale vit maintenant dans les villes, et cette proportion augmentera de 2,5 milliards de personnes d'ici à 2050 (UNDESA, 2014). En Inde, par exemple, le rythme de l'urbanisation ressemble à celui d'une révolution selon le McKinsey Global Institute, et correspond à trois fois celui de la révolution industrielle du dix-neuvième siècle (Paul, 2016). L'urbanisation rapide exige des solutions d'ingénierie pour le transport, la qualité de l'air, la sécurité alimentaire, l'approvisionnement en eau et l'assainissement, l'énergie et les télécommunications. En ce qui

L'ingénierie au service du développement durable

concerne les villes exposées aux catastrophes naturelles et à l'élévation du niveau de la mer, les ingénieurs doivent élaborer des approches durables permettant d'atténuer ces risques et de renforcer la résilience. Ces cas ne sont que des exemples des avantages économiques et sociaux considérables de l'ingénierie.

Le *Rapport mondial sur le développement durable* de l'Organisation des Nations Unies (ONU, 2019) a reconnu l'importance de la science et de la technologie dans le progrès du développement durable, notamment dans les villes, comme l'un des quatre leviers pour la réalisation de l'Agenda 2030. Les nouvelles technologies évoluent rapidement et sont utilisées pour faire en sorte que les villes soient plus intelligentes, plus sûres et plus durables. Par exemple, les technologies de l'information et de la communication, les dispositifs de l'Internet des objets, les vidéos et autres capteurs mis en œuvre permettent de surveiller et d'obtenir des données pour la gestion des villes (FMOI, 2020b). Les technologies avancées telles que la modélisation intégrée des données géospatiales et du bâtiment pour l'urbanisme, notamment l'utilisation de jumeaux numériques, permettent la protection du patrimoine, la surveillance des effets du changement climatique et l'atténuation des effets des catastrophes naturelles, et deviennent plus incontournables pour le développement durable (FMOI, 2020c). L'Union internationale des télécommunications (UIT) et l'UNESCO ont d'ailleurs proposé l'initiative « digital moonshot » pour mettre en place le haut débit en Afrique afin d'accélérer la croissance économique et le développement durable (Commission sur le haut débit, 2019). De même, le Comité d'experts des Nations Unies sur la gestion de l'information géospatiale à l'échelle mondiale a recommandé de résoudre la « fracture numérique géospatiale » en vue du développement durable des infrastructures et des villes (UN-GGIM, 2018).

En outre, les ingénieurs sont de plus en plus sollicités non seulement pour leurs compétences en matière de technologies de pointe, mais aussi pour fournir des services d'ingénierie pour les infrastructures en Afrique, en Asie et en Amérique latine. Par exemple, l'Initiative « La ceinture et la route », dirigée par la Chine³ et qui couvre plus de 65 pays, favorisera le développement de routes, de chemins de fer et de ports en Afrique, en Asie centrale et en Europe, et renforcera la demande en ingénieurs (Wijeratne, Rathbone et Lyn, 2017). Il est attendu des ingénieurs qu'ils innoveront en faveur des infrastructures vertes et des nouvelles villes intelligentes et développent des sources d'énergies renouvelables. Les ingénieurs sont également essentiels pour atténuer les risques de catastrophes naturelles et mettre en œuvre des solutions intégrées de gestion des eaux pour l'utilisation de l'eau dans les environnements urbains (DESA, 2019).

Les avancées technologiques et la naissance d'un nouveau genre d'entrepreneurs a entraîné l'explosion de nouvelles entreprises et de start-up dirigées ou appuyées par les ingénieurs. Les nouvelles entreprises les plus grandes de Chine, Baidu, Alibaba et Tencent, et les plus grandes d'Inde, Flipkart, Ola et d'autres, mènent une révolution qui s'étend maintenant à d'autres parties de l'Asie et de l'Afrique (ETTech, 2018). Ces entreprises créent de nouvelles industries et de nouveaux emplois qui ont des conséquences en cascade sur le reste de l'économie.

Les pays disposant d'assez d'ingénieurs voient leur PIB évoluer (CEBR, 2015). Cependant, leur qualité et leur nombre influent sur les résultats des projets d'ingénierie et leurs contributions à l'économie. Les ingénieurs n'ont pas seulement besoin d'être techniquement qualifiés : ils doivent également intégrer les impératifs et valeurs du vingt-et-unième siècle, à savoir l'utilisation responsable des ressources, la conscience de l'impact éventuellement négatif de leur travail sur la société et l'environnement, et la nécessité de l'atténuer du mieux possible, et l'importance d'un développement inclusif appuyant tant les populations urbaines que rurales, pour éviter les laissés-pour-compte. Il est essentiel qu'un pays dispose de son propre bassin d'ingénieurs, composé des meilleurs intellectuels, hommes et femmes, capables de concevoir, construire et maintenir des travaux d'ingénierie pour atteindre les objectifs nationaux et respecter les normes internationales reconnues pour apporter les plus grands avantages à l'économie.

³ L'Initiative « La ceinture et la route » en Chine se réfère à la ceinture économique de la Route de la soie et à la Route maritime de la soie du vingt-et-unième siècle. Le réseau relie l'Afrique, l'Asie centrale et l'Europe, et passe par plus de 65 pays et régions qui comprennent une population d'environ 4,4 milliards de personnes et un tiers de l'économie mondiale. Il englobera d'importants travaux d'ingénierie pour développer les routes, les chemins de fer, les ports, les aéroports et d'autres infrastructures, et renforcer les capacités industrielles, ce qui impliquera un investissement, un financement et un commerce importants.

Rôle de l'ingénierie dans le développement durable

En septembre 2015, 193 membres de l'Assemblée générale des Nations Unies se sont rassemblés pour déclarer leur engagement aux ODD. Ces 17 Objectifs représentent une approche intégrée de la gestion des impératifs de réduction de la pauvreté, du besoin urgent de commodités essentielles pour de nombreuses personnes (notamment l'éducation, la santé et l'assainissement), l'égalité des genres, les effets des changements climatiques et l'appauvrissement rapide des ressources mondiales. En décembre 2015 à la 21^e Conférence des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CdP 21) à Paris⁴, le monde a convenu des cibles d'émissions mondiales et s'est engagé à limiter le réchauffement du climat à un maximum de 2 °C (CCNUCC, 2015).

Chaque nation a des engagements à tenir à l'aide au travail des ingénieurs, d'autant plus que la réalisation de chacun des 17 ODD exigera l'implication de l'ingénierie (tableau 1). Ces défis mondiaux exigent une ingéniosité sans précédent de la part des ingénieurs pour élaborer et mettre en œuvre les solutions nécessaires pour atteindre ces objectifs. Les ingénieurs sont maintenant nécessaires pour changer le monde de nouveau, et contribuer à mettre en place un monde plus intelligent engagé dans le développement durable pour tous. Un nouveau type d'ingénierie et d'ingénieurs est donc nécessaire pour intégrer les valeurs et les objectifs du développement durable dans leur travail. Les gouvernements, les dirigeants et la communauté doivent comprendre le rôle clé de l'ingénierie dans la réalisation du développement durable. Des initiatives telles que la « Journée mondiale de l'ingénierie pour le développement durable » contribueront à mieux faire comprendre ce rôle (encadré 1).

Par exemple, on estime que près de 12 % de la population mondiale en 2016 n'avait pas d'électricité (Our World in Data)⁵. En 2015, trois personnes sur dix (2,1 milliards de personnes) n'avaient pas accès à une eau potable sûre, et six personnes sur dix (4,5 milliards de personnes) ne disposaient pas d'installations d'assainissement gérées en toute sécurité (WWAP, 2019). Relever ces défis exige d'adopter une approche plus réfléchie qui englobe les aspects sociaux, humains, économiques et environnementaux de l'ingénierie. En outre, cette ingénierie fondée sur des valeurs n'est toujours pas intégrée au programme d'ingénierie de la majorité des établissements éducatifs.

Encadré 1. Journée mondiale de l'ingénierie pour le développement durable

La Journée mondiale de l'ingénierie pour le développement durable célébrée le 4 mars est une journée de célébration annuelle des ingénieurs et de l'ingénierie de l'UNESCO.

La proposition de cette journée mondiale vient de la FMOI, en guise de reconnaissance du rôle important qu'a l'ingénierie dans la réalisation des Objectifs de développement durable de l'ONU ; cette date marque également la création de la Fédération. La Journée mondiale de l'ingénierie pour le développement durable est une occasion de célébrer les ingénieurs et l'ingénierie dans le monde entier, et de s'engager avec la communauté, le gouvernement et les dirigeants dans le rôle important qu'a l'ingénierie dans le monde moderne.

Quatre-vingts lettres de soutien ont été envoyées à l'UNESCO par des établissements internationaux et nationaux, des académies et des commissions nationales, qui représentent 23 millions d'ingénieurs dans le monde et influent sur 2 milliards de personnes. Cette résolution a été appuyée par les États membres de l'UNESCO et par plus de 40 nations de tous les continents notamment : Arabie saoudite, Bangladesh, Chine, Comores, Côte d'Ivoire, Égypte, Éthiopie, Fédération de Russie, France, Gabon, Gambie, Guatemala, Guinée équatoriale, Iran, Iraq, Jordanie, Kenya, Libéria, Madagascar, Mali, Mozambique, Namibie, Nicaragua, Nigéria, Oman, Palestine, Philippines, Pologne, République dominicaine, République islamique du Pakistan, Royaume-Uni, Sénégal, Serbie, Tanzanie, Tunisie, Turquie, Uruguay, Zimbabwe, entre autres. Cet appui général témoigne de la reconnaissance du rôle important de l'ingénierie dans le développement durable par le gouvernement.

Le logo de la Journée mondiale de l'ingénierie traduit le rôle de l'ingénierie et du développement durable dans le monde, et est accessible à tous. Les célébrations coordonnées de la Journée



mondiale de l'ingénierie à travers le monde permettent de bénéficier d'une couverture médiatique pour des événements importants, et ainsi d'accroître la visibilité de l'ingénierie. Les canaux de réseaux sociaux seront utilisés pour impliquer les jeunes en particulier, et les

établissements qui célèbrent l'événement devront enregistrer leurs événements sur un site Web dédié pour créer une dynamique en vue des célébrations. Quarante-vingt-dix événements ont été célébrés dans 50 pays en 2020, et il est prévu qu'ils s'étendent d'année en année et gagnent en importance au fur et à mesure que chaque pays célèbre l'ingénierie et s'approprie cette journée mondiale⁶.

La Journée mondiale de l'ingénierie pour le développement durable est une occasion de s'engager avec le gouvernement et l'industrie pour aborder le rôle et l'impact de l'ingénierie sur l'économie et la société, de reconnaître le besoin en capacités et en ingénieurs qualifiés dans le monde, et d'élaborer des cadres stratégiques et des meilleures pratiques pour mettre en œuvre les solutions d'ingénierie visant au développement durable. Elle permet également d'encourager les jeunes femmes à envisager une carrière d'ingénieur.

De surcroît, la Journée mondiale de l'ingénierie pour le développement durable peut être utilisée pour impliquer les jeunes partout dans le monde, et leur dire : « Si vous souhaitez améliorer le monde, devenez ingénieur. »

4 Connue sous le nom d'Accord de Paris.

5 Voir le nombre de personnes ayant ou n'ayant pas accès à l'électricité à travers le lien suivant : <https://ourworldindata.org/grapher/number-of-people-with-and-without-electricity-access>

6 Pour en savoir plus sur la Journée mondiale de l'ingénierie pour le développement durable, <https://worldengineeringday.net/fr/about-wed-4>

Bien prévoir : l'offre et la demande d'ingénieurs

Bien que les ingénieurs soient essentiels pour réaliser les ODD et respecter les aspirations des nations en développement, le monde souffre actuellement d'un manque d'ingénieurs et de leur niveau parfois insuffisant de compétences.

Aussi limitées que soient les données statistiques mondiales, elles font apparaître une demande accrue d'ingénieurs et un besoin croissant de transformation technologique dans les pays développés et en développement. Les domaines dans lesquels la demande est la plus élevée en Afrique sont l'ingénierie agricole et l'ingénierie civile permettant d'appuyer le développement de l'agriculture, qui représente actuellement 15 % du PIB, et le développement des infrastructures (Gachanja, 2019). En Afrique du Sud, la pénurie est presque critique (Nyatsumba, 2017).

Dans les pays développés, des données provenant du Bureau des statistiques de travail des États-Unis montrent qu'on estime que le nombre de postes impliquant les technologies informatiques et l'ingénierie augmentera de 12,5 % par an jusqu'en 2024, et que ces postes auront également des salaires plus élevés que la moyenne (Fayer, Lacey et Watson, 2017). Des données provenant de l'Organisation de coopération de développement économiques (OCDE) montrent également que l'augmentation du nombre d'emplois est la plus élevée pour l'ingénierie et les technologies de l'information et des communications, en réponse à la transformation numérique des économies dans le monde (OCDE, 2017a). Le rapport intitulé *Future of jobs*, élaboré par le Forum économique mondial, montre également que ces domaines feront sans doute l'objet de la plus grande demande d'ici à 2020 (Forum économique mondial, 2016). Les ingénieurs logiciels, civils, mécaniciens et électriciens sont demandés dans de nombreux pays du monde, et des pénuries critiques sont signalées dans certaines régions (OCDE, 2017b).

La participation des femmes dans l'ingénierie est également un problème important, qui doit être réglé en urgence, non seulement pour accroître le nombre d'ingénieurs disponibles dans le monde, mais également pour veiller à ce que les meilleurs intellectuels soient en mesure de régler les problèmes que pose le développement durable (UNESCO, 2018)⁷. Les problèmes liés au renforcement de la diversité et de l'inclusion dans l'ingénierie sont abordés dans le chapitre 2.

Il est clair que la politique gouvernementale doit viser à fournir le nombre d'ingénieurs nécessaire pour que l'économie évolue et prospère. Les gouvernements doivent rendre l'ingénierie attrayante pour les jeunes hommes et femmes, et garantir

l'appui financier et institutionnel nécessaire pour que davantage d'ingénieurs soient diplômés. En Malaisie par exemple, une approche stratégique de l'enseignement des sciences, de la technologie, de l'ingénierie et des mathématiques a entraîné une augmentation importante du nombre d'ingénieurs hommes et femmes au cours des dix dernières années (Ministère de l'enseignement supérieur de Malaisie, MOHE, 2010). Il est également nécessaire de mettre l'accent sur les contributions de l'ingénierie à la communauté, et sur les contributions des ingénieurs et de l'ingénierie par le passé, ainsi que leur capacité à contribuer à un meilleur monde pour le futur.

Bien former : qualité des ingénieurs au-delà des compétences techniques

Il est essentiel pour de nombreux pays de veiller à ce qu'assez d'ingénieurs soient diplômés pour répondre à la demande de l'économie, mais aussi à ce qu'ils soient assez qualifiés (voir chapitre 5). De nombreux pays forment un grand nombre de diplômés qui ne disposent pas des compétences de base nécessaires pour travailler comme ingénieur compétent. Les impératifs du développement durable exigent également d'examiner en urgence les programmes d'ingénierie pour y intégrer de nouvelles compétences requises par les employeurs et la société pour gérer les défis associés : atténuer les effets des changements climatiques et veiller à ce que les travaux d'ingénierie répondent aux aspirations et aux besoins sociaux.

Le système de développement du capital humain dans le cadre de l'ingénierie est principalement d'ordre national. Il comprend les établissements d'enseignement et les organismes organisationnels de l'ingénierie qui garantissent la qualité de l'enseignement grâce à des processus d'accréditation et à la réglementation des ingénieurs en activité grâce aux systèmes d'enregistrement.

La qualité des ingénieurs diplômés est généralement garantie grâce à l'accréditation des établissements mandatés, soit par les départements gouvernementaux chargés de l'enseignement, soit par les établissements professionnels d'ingénierie. Le développement professionnel continu et les compétences des ingénieurs sont principalement garantis grâce à la formation fournie par les établissements professionnels d'ingénierie qui accordent des accréditations professionnelles, par exemple les ingénieurs « agréés ». L'inscription des ingénieurs peut être effectuée par les organismes chargés de l'enregistrement qui œuvrent dans le cadre de la législation gouvernementale ou

⁷ Les données mondiales relatives à la participation des femmes dans l'ingénierie ne sont pas disponibles ; toutefois, des données provenant de divers pays tels que l'Australie, le Canada, la Nouvelle-Zélande et les États-Unis, ainsi que des données anecdotiques, soulignent le faible niveau de participation des femmes à l'ingénierie. Le projet STEM et égalité des genres de l'UNESCO vise à répondre au manque de données dans ces domaines.

sous les auspices des établissements professionnels d'ingénierie. Le système est complexe et diffère selon les pays, ainsi que selon les disciplines d'ingénierie au sein d'un pays. En général, les disciplines d'ingénierie relatives à la construction (civile, structurelle, mécanique et électrique) sont réglementées par le gouvernement du fait des questions de sécurité en ce qui concerne les bâtiments et les autres structures. Les nouvelles disciplines de l'ingénierie, telles que la nano-ingénierie et l'ingénierie biomédicale, sont peu réglementées formellement ou ne le sont pas.

Les accords internationaux multilatéraux et bilatéraux favorisent la reconnaissance mutuelle des systèmes d'enseignement de l'ingénierie qui respectent les normes convenues (Hanrahan, 2013). Ces accords sont importants pour veiller à ce que les systèmes nationaux respectent les normes appropriées selon les références internationales. Cependant, de nombreux systèmes sont régionaux et internationaux et couvrent une ou plusieurs disciplines⁸. Les deux accords multilatéraux les plus importants sont le Réseau européen pour l'accréditation des ingénieurs (ENAAE)⁹, qui autorise l'accréditation, et les agences d'assurance qualité qui délivrent l'accréditation européenne EUR-ACE[®] aux programmes d'ingénierie diplômants accrédités, surtout en Europe, et ses 22 signataires. L'Alliance internationale d'ingénierie (IEA) gère 7 accords multilatéraux relatifs à l'enseignement de l'ingénierie et aux compétences professionnelles des ingénieurs, spécialistes en technologies et techniciens dans 30 pays et régions (ieagrements.org¹⁰). En Amérique latine, l'Accord de Lima¹¹, signé en 2016, offre une reconnaissance mutuelle et dispose actuellement de sept signataires, et son règlement intérieur et son site Web sont en cours d'élaboration.

Les disciplines d'ingénierie émergentes telles que l'ingénierie logicielle sont couvertes par d'autres accords, notamment l'Accord de Séoul¹², qui offre actuellement une reconnaissance mutuelle en ce qui concerne les programmes informatiques et relatifs aux technologies de l'information et a huit signataires. Par ailleurs, des établissements mondiaux enseignant une discipline unique fournissent une accréditation aux programmes d'enseignement de l'ingénierie appartenant à leur domaine, par exemple l'Institut d'ingénierie électrique et électronique (IEEE)¹³ pour les professionnels de ce domaine. Les programmes d'ingénierie chimique sont souvent accrédités par l'Institution of Chemical Engineers, au Royaume-Uni (icheme.org)¹⁴. Certains organismes nationaux d'accréditation, tels que l'Accreditation Board for Engineering and Technology basé aux États-Unis (ABET)¹⁵, fournissent des services internationaux

d'accréditation à divers systèmes. Dans de nombreux pays, les établissements respectent les références internationales grâce à ces accréditations, mais elles ont un coût élevé.

Les systèmes de reconnaissance mutuelle de l'enseignement de l'ingénierie et d'accréditation des programmes d'enseignement de l'ingénierie, tant nationaux qu'internationaux, sont clairement complexes. Cela signifie que, pour renforcer les capacités de l'ingénierie (accroître le nombre et renforcer la qualité des ingénieurs), le système dans son ensemble doit être appuyé et évoluer. Des efforts considérables sont requis pour renforcer les capacités du système de l'enseignement de l'ingénierie afin que les établissements élèvent le niveau de leurs normes pour remplir les exigences des employeurs relatives à la compétence des ingénieurs et répondre aux besoins des pays de se développer durablement.

La majorité des signataires des accords de reconnaissance mutuelle proviennent de pays à revenu élevé et intermédiaire. Le faible nombre de signataires aux divers accords de reconnaissance mutuelle signifie que la majorité de l'Afrique, de l'Asie et de l'Amérique latine sont en retard quant au respect des normes mondiales relatives à l'enseignement de l'ingénierie. Dans de nombreux pays, les organisations nécessaires, comme les organismes d'accréditation ou les établissements professionnels d'ingénierie, n'existent tout simplement pas.

Il y a un manque significatif de capacités, dans de nombreux pays, de formation d'ingénieurs disposant des compétences requises, et ces derniers sont maintenant nécessaires en urgence. Par exemple, les universitaires du domaine de l'ingénierie peuvent avoir besoin d'une formation et d'un mentorat pour parvenir aux résultats diplômants souhaités, et il est possible que des systèmes d'accréditation doivent être établis pour veiller à ce que les établissements d'enseignement soient légitimes et disposent des ressources et systèmes nécessaires pour offrir une formation professionnelle continue et maintenir les compétences. Dans la majorité des pays, les efforts de renforcement des capacités ont tendance à s'axer sur une partie du système à la fois (souvent les universités d'ingénierie). Au niveau international, le manque de financement fait dépendre le développement de ces systèmes, ainsi que l'appui nécessaire, du travail d'un faible nombre de volontaires, et les progrès réalisés sont donc lents.

Une action urgente est requise pour offrir du mentorat et de l'appui dans les pays n'étant pas signataires des accords multilatéraux afin de garantir le développement d'institutions

8 Par exemple, voir : <https://www.abet.org/global-presence/mutual-recognition-agreements>

9 Site Web officiel du Réseau européen pour l'accréditation des ingénieurs : www.enaee.eu

10 Site Web officiel IEAgreements.org : www.ieagrements.org

11 Site Web officiel de l'Accord de Lima : <https://limaaccord.org>

12 Site Web officiel de l'Accord de Séoul : <https://www.seoulaccord.org>

13 Comité d'agrément IEEE : www.ieee.org/education/accreditation/accred-committees/ceaa.html

14 IChemE.org. Universities: Accredite your degree, voir www.icheme.org/education/universities-accredit-your-degree

15 Site Web de l'Accreditation Board for Engineering and Technology : www.abet.org

L'ingénierie au service du développement durable

efficaces, dans le cadre des systèmes nationaux d'enseignement de l'ingénierie, qui soient en mesure de garantir des diplômes à des ingénieurs respectant les normes requises. Cette action ne garantira pas seulement l'utilisation efficace et effective des ressources d'éducation dans ces pays, mais accélérera également la formation d'une nouvelle génération d'ingénieurs disposant des compétences requises pour contribuer efficacement à leur pays.

Une action coordonnée est idéalement nécessaire au niveau international. Menées par l'UNESCO, des organisations telles que la Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs (FMOI) et des organismes de financement comme la Banque mondiale peuvent veiller à ce qu'une norme d'ingénierie unique et mondiale soit reconnue et à ce que la fragmentation des systèmes soit évitée. Cette fragmentation n'entraînerait que de multiples systèmes et normes aux effets néfastes potentiels, qui entraveraient la réalisation des objectifs liés au développement durable.

Au vu de la vaste demande latente, il n'est pas surprenant de constater que de multiples systèmes se sont déjà développés au cours des cinq dernières années, ce qui peut entraîner davantage de fragmentation dans un système déjà complexe. Par exemple, la Fédération des établissements de formation des ingénieurs de l'Asie du Sud-Est et du Pacifique a mis en œuvre un programme de mentorat et d'appui pour les établissements de l'Asie et du Pacifique. La reconnaissance des établissements est offerte par l'intermédiaire du document intitulé « FEIAP Engineering Education Guidelines (FEEG) », entraînant la reconnaissance de l'inscription des ingénieurs en tant qu'« ingénieurs de l'APEC ». Bien qu'initialement établis pour appuyer les pays de l'Asie et du Pacifique, et au vu de la demande considérable, le mentorat et l'appui ont été étendus au Nigéria à travers le Conseil pour la réglementation de l'ingénierie au Nigéria (COREN) et au Rwanda (Chuah, 2013 ; Liu, Liang et Than, 2016). Le programme intitulé « Digital @ B&R Double Hundred Universities Cooperation (DHUCP) » est un projet collaboratif entre le Sugon Ruiyi Education Cooperation Center en Chine et la Developing World Academy of Engineering and Technology (AETDEW), dont le siège est en Malaisie, pour appuyer la formation et le renforcement des compétences dans les 68 pays faisant partie de l'Initiative « La ceinture et la route » (AETDEW, 2019). Le programme s'axe actuellement sur les nouvelles technologies de l'information, y compris l'intelligence artificielle et les mégadonnées, mais il pourrait également s'étendre à d'autres disciplines d'ingénierie, et servir d'éventuel nouveau point de repère pour l'enseignement de l'ingénierie.

Le Gouvernement fédéral allemand a augmenté le budget pour la collaboration en matière d'enseignement de l'ingénierie, surtout avec les pays subsahariens. Les universités allemandes souhaitent transférer les connaissances en ingénierie en Afrique et collaborer au niveau de la recherche et de l'enseignement aux normes européennes (Sawahel, 2018).

Le projet GCRF Africa Catalyst de l'Académie royale d'ingénierie a reçu un financement important du Ministère britannique du développement international¹⁶ afin d'appuyer le renforcement des capacités en Afrique et le développement des établissements professionnels d'ingénierie, et d'attirer davantage de filles vers cette carrière¹⁷. Grâce au financement supplémentaire reçu de la fondation Lloyds Foundation, le *Global Engineering Capability Review* (RAEng, 2020) a vu le jour, et recommande « la formation d'ingénieurs hautement qualifiés capables de mener à bien leur tâche » et des données mondiales plus précises sur l'ingénierie, une recommandation rejoignant en droite ligne celles du présent chapitre.

D'autres établissements, tels que l'International Federation of Engineering Education Societies (IFEES)¹⁸ et le Conseil mondial des doyens des sciences de l'ingénieur, se sont engagés à améliorer les normes d'enseignement de l'ingénierie grâce à la formation et au mentorat des universitaires en ingénierie dans les pays en développement. Le Conseil mondial des ingénieurs civils (WCCE) examine également les normes actuelles d'enseignement de l'ingénierie civile pour veiller à ce qu'elles répondent aux besoins actuels et futurs de l'industrie¹⁹.

La Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs, qui est l'organisme principal des ingénieurs, et représente près de 100 pays et 30 millions d'ingénieurs, dirige le renforcement des capacités d'enseignement de l'ingénierie. Au vu de sa portée mondiale et de son large mandat qui couvre toutes les disciplines de l'ingénierie, elle joue un rôle clé dans la direction et la coordination de projets visant à développer une référence internationale reconnue pour les qualités des diplômés et les compétences professionnelles, et à renforcer les capacités d'ingénierie nécessaires pour réaliser les ODD à long terme.

La Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs a mobilisé le système de l'ingénierie, ses universitaires et universités, le gouvernement, l'industrie et les établissements d'entreprises et professionnels d'ingénierie en tant que parties prenantes d'un partenariat interrelié qui optimise les résultats d'ingénierie pour produire les meilleurs résultats pour tous. Les membres nationaux et internationaux de la Fédération mondiale, qui dirigent les établissements professionnels d'ingénierie, ont un rôle clé à jouer

16 Il y a longtemps que le Ministère du développement international a été remplacé par le Foreign, Commonwealth & Development Office (FCDO).

17 Pour de plus amples informations : <https://www.raeng.org.uk/global/sustainable-development/africa-grants/africa-catalyst>

18 Pour de plus amples informations : www.ifees.net/iidea

19 Pour de plus amples informations : <https://wcce.biz/index.php/issues/education/268-effed>

dans cette entreprise dans les pays en développement et les réponses spécifiques aux régions.

Pour se servir des partenariats pour réaliser les ODD (ODD 17), la Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs a collaboré avec les organisations internationales d'ingénieurs clés suivantes, pour prendre des mesures coordonnées relatives à l'enseignement et la pratique de l'ingénierie :

- l'IEA, qui héberge les accords et arrangements internationaux visant à la reconnaissance mutuelle des qualifications d'ingénierie.
- l'IFEES et le GEDC, qui sont constitués d'établissements d'enseignement de l'ingénierie et d'universitaires au premier plan de l'enseignement de l'ingénierie.
- La Fédération internationale des ingénieurs-conseils (FIDIC), qui est l'organisme principal d'associations d'ingénieurs-conseils au monde, représente les organisations d'ingénieurs dans le domaine du conseil, qui emploient près de 40 % des ingénieurs au monde.
- Le Réseau international des femmes ingénieurs et scientifiques (INWES), qui est l'organisme principal d'associations de femmes ingénieurs et scientifiques au monde, représente internationalement les femmes et filles dans le domaine des STEM.
- Les centres majeurs de l'UNESCO de catégorie II : le Centre international pour la coopération Sud-Sud dans le domaine des sciences, de la technologie et de l'innovation en Malaisie, qui s'intéresse principalement à la coopération Sud-Sud pour renforcer les capacités d'ingénierie, et le Centre international pour l'enseignement de l'ingénierie, à l'Université Tsinghua, dont les efforts portent sur le renforcement des capacités pour l'enseignement de l'ingénierie dans les pays en développement.

Le réseau de plus en plus riche d'organisations rassemble des parties prenantes clés pour le système de l'ingénierie et produit des résultats cohérents qui appuieront les normes internationales d'enseignement de l'ingénierie et garantiront la reconnaissance mutuelle et la mobilité mondiale des ingénieurs. Le réseau permet aux ingénieurs ayant suivi l'enseignement et la formation appropriés et jouissant de l'expérience nécessaires d'être déployés dans le monde entier, dans les régions où l'on a le plus besoin de leur expertise pour développer des solutions en faveur du développement durable.

Les exigences spécifiques de l'enseignement de l'ingénierie sont abordées dans le chapitre 4, et ne le sont pas. Les détails des projets dirigés par la Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs sont donnés dans l'encadré 1.2 (FMOI, 2018).

Des progrès considérables ont été réalisés par l'UNESCO, la FMOI et l'IEA dans l'examen des références en ce qui concerne les qualités des diplômés pour les ingénieurs, des spécialistes en technologie et des techniciens professionnels, et pour leurs compétences professionnelles une fois dans le monde du travail. Ces changements sont axés sur l'utilisation des technologies de l'information, des données et des analyses, sur la capacité à apprendre et à s'adapter aux technologies nouvelles et émergentes tout en tenant compte de la société et de l'environnement. Ils visent à répondre aux objectifs des ODD en vue d'une approche intégrée de solutions d'ingénierie qui tient compte des personnes, de la planète et de la prospérité. Ils ont également réussi à intégrer les cultures, les comportements et les valeurs pour renforcer la diversification et l'inclusion de la profession, et pour favoriser une approche et une responsabilité éthiques dans l'ensemble en vue du développement des solutions d'ingénierie. Le confinement dû à la COVID-19 a accéléré la communication et les consultations en ligne avec la profession d'ingénieur, et le monde l'a remarquablement vite intégré, ce qui montre que les ingénieurs reconnaissent le besoin urgent de changement afin de maintenir l'acceptabilité publique pour des solutions d'ingénierie pertinentes et contemporaines.

Les gouvernements et les organismes de financement tels que l'UNESCO et la Banque mondiale jouent un rôle fondamental dans l'appui à ces activités. Le plan de travail a été défini et prévu, et aborde le caractère multiple des systèmes, les besoins des normes d'enseignement de l'ingénierie qui répondent aux besoins actuels et futurs, et le besoin d'appui aux systèmes nationaux d'enseignement des sciences de l'ingénieur dans les pays en développement. Le financement déterminera la vitesse du changement et l'impact potentiel de ces initiatives est important et bénéficiera à des millions de personnes dans le monde.

Encadré 1.2. Plan d'ingénierie de la FMOI à l'horizon 2030

La Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs a élaboré un plan qui répond au besoin en ingénieurs qualifiés pour progresser vers les ODD. Les projets qui faisaient partie de ce Plan ont été établis au début de l'année 2018 et se poursuivront jusqu'en 2030, accompagnés de rapports annuels.

Les projets actuels et futurs mis en œuvre par la FMOI et ses partenaires internationaux comprennent :

- L'examen des références internationales actuelles d'enseignement de l'ingénierie en ce qui concerne les qualités des diplômés et les compétences professionnelles afin de veiller à ce qu'elles respectent les exigences des employeurs actuels et futurs, et l'intégration des valeurs et principes du développement durable, de la diversité et de l'inclusion, ainsi que de la pratique éthique de l'ingénierie. Les recommandations du présent rapport contribuent de manière significative à ce projet, qui est sur la bonne voie pour un partenariat entre l'UNESCO, la FMOI et l'IEA.
- L'amélioration des normes d'enseignement des sciences de l'ingénieur au sein des systèmes nationaux d'ingénierie, notamment la formation d'enseignants de l'ingénierie, en vue d'étendre la portée de la reconnaissance mutuelle de l'enseignement de l'ingénierie et le développement professionnel des ingénieurs grâce au mentorat et à des initiatives de soutien par les établissements respectant déjà les normes internationales. Ces établissements sont les membres nationaux de la FMOI et bénéficient d'un appui en Afrique, en Asie et en Amérique latine.
- La facilitation de la formation professionnelle tout au long de la vie pour appuyer les ingénieurs au cours de leur carrière en partenariat avec des employeurs essentiels de l'ingénierie tels que la FIDIC, pour laquelle les membres nationaux de la FMOI serviront de mécanisme de prestation.
- Le renforcement de la participation des femmes et des filles à l'ingénierie grâce à des programmes visant à rendre plus attractives les sciences et les mathématiques pour celles-ci, et pour qu'elles envisagent une carrière dans l'ingénierie, ainsi que la promotion de changements dans les programmes et les exigences de développement professionnel qui appuieront le maintien des femmes dans l'ingénierie. Les recommandations du présent rapport traitent de la diversité et de l'inclusion dans l'ingénierie et contribuent de manière significative à ce projet.
- L'appui aux activités des centres de l'UNESCO de catégorie II tels que le Centre international pour l'enseignement de l'ingénierie, basé à l'Université Tsinghua, en Chine, et le Centre international pour la coopération Sud-Sud dans le domaine des sciences, de la technologie et de l'innovation, basé en Malaisie, ainsi que d'autres centres en Afrique et en Amérique.
- L'appui aux approches visant à reconnaître, aux niveaux régional et international, les qualifications relatives à l'ingénierie et les accréditations professionnelles, en partenariat avec l'IEA et l'UNESCO.

Conclusion

Les ingénieurs changent le monde depuis des milliers d'années. Les progrès dans les sciences, l'ingénierie et la technologie ont entraîné des solutions d'ingénierie qui ont soutenu les révolutions industrielles successives, ce qui a stimulé la croissance économique. En pleine période de confinement et à l'aube de la quatrième révolution industrielle, les ingénieurs sont plus que jamais nécessaires. Les ingénieurs et leurs compétences sont reconnus comme vitaux pour la croissance économique et pour réaliser les objectifs liés au développement durable.

Il y a toutefois un manque de compréhension entre les gouvernements, les dirigeants et la communauté dans son ensemble au sujet du rôle des ingénieurs et de l'ingénierie dans la société moderne pour parvenir au développement durable. Il y a également une pénurie mondiale d'ingénieurs, surtout de ceux disposant des compétences requises pour relever les défis du développement durable. Il est également essentiel de gérer le manque de participation des femmes et des filles à l'ingénierie. Pourtant, leur participation est fondamentale pour augmenter le nombre d'ingénieurs et garantir la diversité de pensée et les innovations essentielles pour développer les solutions nécessaires à l'atteinte des ODD.

Une action urgente est nécessaire de la part des gouvernements, de l'industrie, du milieu universitaire et de la profession de l'ingénierie pour collaborer et augmenter le nombre d'ingénieurs, et pour financer et appuyer une approche internationalement harmonisée des qualités des diplômés en ingénierie et les compétences professionnelles requises pour atteindre les objectifs liés au développement durable. Ces normes doivent être reconnues partout dans le monde et former la base des systèmes nationaux d'enseignement de l'ingénierie pour les ingénieurs ayant les bonnes compétences, surtout en Asie, en Afrique et en Amérique latine. Il n'y a pas de temps à perdre, car cette action est essentielle pour réaliser le Programme de développement durable à l'horizon 2030.

Recommandations

- 1.** Le gouvernement, les enseignants de l'ingénierie, l'industrie et les établissements professionnels d'ingénierie doivent encourager une meilleure compréhension du rôle critique des ingénieurs et de l'ingénierie pour bâtir un monde plus durable.
- 2.** Le gouvernement, les enseignants de l'ingénierie, l'industrie et les établissements professionnels d'ingénierie doivent collaborer pour financer et appuyer des stratégies visant à accroître le nombre d'ingénieurs, à introduire une approche internationalement harmonisée des qualités des diplômés en ingénierie et à promouvoir les compétences professionnelles continues pour garantir la capacité des ingénieurs à atteindre les objectifs de développement durable. Ces références doivent être reconnues partout dans le monde et devraient former la base des systèmes nationaux d'enseignement de l'ingénierie pour les ingénieurs formés ayant les bonnes compétences, surtout en Asie, en Afrique et en Amérique latine.
- 3.** Les gouvernements et les dirigeants devraient prendre des mesures urgentes pour encourager davantage de jeunes, en particulier les filles, à envisager une carrière dans l'ingénierie, afin de lutter contre le manque d'ingénieurs et garantir la diversité de raisonnement et la participation inclusive, qui sont cruciales pour atteindre les objectifs liés au développement durable.

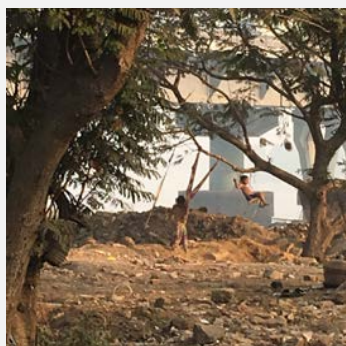
Références

- Abdullah, N. et Anuar, A. 2018. Old politics and new media: Social media and Malaysia's 2018 elections, *The Diplomat*, 8 mai. <https://thediplomat.com/2018/05/old-politics-and-new-media-social-media-and-malysias-2018-elections>
- AETDEW. 2019. Data@China Hundred Universities Project (DCHUP). The Academy of Engineering and Technology of the Developing World http://en.aetdewobor.com/?page_id=2096
- Beaumont, P. 2011. The truth about Twitter, Facebook and the uprisings in the Arab world, *The Guardian*, 25 février. www.theguardian.com/world/2011/feb/25/twitter-facebook-uprisings-arab-libya
- Broadband Commission. 2019. *Connecting Africa Through Broadband. A strategy for doubling connectivity by 2021 and reaching universal access by 2030*. Broadband Commission Working Group on Broadband for All: A "Digital Moonshot for Africa". L'Union internationale des télécommunications (ITU) et l'UNESCO. https://www.broadbandcommission.org/Documents/working-groups/DigitalMoonshotforAfrica_Report.pdf
- CCNUCC. 2018. *Accord de Paris*. Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf
- CEBR. 2015. *The contribution of engineering to the UK economy – the multiplier impacts*. A report for Engineering UK. Londres, Centre for Economics and Business Research Ltd. www.engineeringuk.com/media/1323/jan-2015-cebr-the-contribution-of-engineering-to-the-uk-economy-the-multiplier-impacts.pdf
- Chuah, Hean Teik. 2013. Engineer mobility and FEIAP engineering education guideline. <http://feiap.org/wp-content/uploads/2013/10/Engineer%20Mobility%20and%20FEIAP%20Guideline%202013%20.pdf>
- DESA. 2014. *World population prospects: The 2014 revision, Highlights*. Département des affaires économiques et sociales, Division de la population. New York, Organisation des Nations Unies. <https://esa.un.org/unpd/wup/Publications/Files/WUP2014-Highlights.pdf>
- DESA. 2019. *World Urbanization Prospects 2018 Highlights*. Département des affaires économiques et sociales, Division de la population. New York, Organisation des Nations Unies. <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Highlights.pdf>
- ETtech. 2018. Economic Times India start up barometer 2018, 17 août. <https://tech.economicstimes.indiatimes.com/news/startups/et-india-startup-barometer-2018/65434582>
- Fayer, S., Lacey, A. et Watson, A. 2017. *STEM occupations: Past, present, and future*. Washington, D.C., Bureau of Labor Statistics, États-Unis. www.bls.gov/spotlight/2017/science-technology-engineering-and-mathematics-stem-occupations-past-present-and-future/pdf/science-technology-engineering-and-mathematics-stem-occupations-past-present-and-future.pdf
- FMOI. 2018. *WFEO Engineering 2030. A Plan to advance the achievement of the UN Sustainability Goals through engineering*. Rapport d'activité n°1. Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs. www.wfeo.org/wp-content/uploads/un/WFEO-ENgg-Plan_final.pdf
- FMOI. 2020a. *Covid-19 Information Portal*. Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs. <http://www.wfeo.org/covid-19-proposals-from-engineers>
- FMOI. 2020b. *Smart Cities – Adoption of Future Technologies*. Comité de l'information et de la communication. Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs. <https://worldengineeringday.net/wp-content/uploads/2020/03/Smart-City-IOT-WFEO-Version-1.pdf>
- FMOI. 2020c. *The Value of Integrated Geospatial and Building Information Modelling (BIM) solutions to advance the United Nations Sustainable Development Goals (Agenda 2030) with specific focus on resilient infrastructure*. Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs, Conseil mondial de l'industrie géospatiale, comité d'experts des Nations Unies sur la gestion de l'information géospatiale à l'échelle mondiale. <https://www.wfeo.org/wfeo-wgic-unggim-white-paper-geospatial-engg-sustainable-development>
- Forum économique mondial. 2016. *The Future of Jobs. Employment, Skills, and Workforce Strategy of the Fourth Industrial Revolution*. The Global Challenge Insight Report. Genève, Forum économique mondial. www3.weforum.org/docs/WEF_Future_of_Jobs.pdf
- Gachanja, N. 2019. 10 most sought after jobs in Africa. www.africa.com/top-10-most-sought-after-jobs-in-africa
- Hanrahan, H. 2013. Towards global recognition of engineering qualifications accredited in different systems. Présentation lors de la conférence de l'ENAAE, Louvain, Belgique, septembre 2013. <https://www.enaee.eu/wp-content/uploads/2018/11/HANRAHAN-Paper-130820.pdf> <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000266102>
- Liu, M. Liang J. L. et Than, C. 2016. IIEET's mentoring of Myanmar in engineering accreditation system. Document présenté lors du 5^e Forum international de l'ASEE, Nouvelle-Orléans, 25 juin 2016. <https://peer.asee.org/ieet-s-mentoring-of-myanmar-in-engineering-accreditation-system>
- Maloney, W. F. et Caicedo, F. V. 2016. Engineering growth: Innovative capacity and development in the Americas. CESifo Working Paper Series 6339. <http://eh.net/eha/wp-content/uploads/2016/09/Engineers-County7A.pdf>

- MOHE Malaysia. 2010. *The National Higher Education Strategic Plan Beyond 2020*. Putrajaya, Ministry of Higher Education. www.ilo.org/dyn/youthpol/en/equest.fileutils.dochandle?p_uploaded_file_id=477
- Newkirk, V. R. 2017. How redistricting became a technological arms race, *The Atlantic*, 28 octobre. www.theatlantic.com/politics/archive/2017/10/gerrymandering-technology-redmap-2020/543888
- Nyatumba, K. M. 2017. South Africa's escalating engineering crisis. www.iol.co.za/business-report/south-africas-escalating-engineering-crisis-11670238
- OCDE. 2017a. *Science, technologie et industrie : Tableau de bord de l'OCDE 2017*. Organisation de coopération et de développement économiques. Paris, Éditions OCDE. www.oecd-ilibrary.org/science-and-technology/oecd-science-technology-and-industry-scoreboard-2017_9789264268821-en
- OCDE. 2017b. Getting skills right. Skills for jobs indicators. Organisation de coopération et de développement économiques. Paris, Éditions OCDE. https://read.oecd-ilibrary.org/employment/getting-skills-right-skills-for-jobs-indicators_9789264277878-en#page1
- ONU. 2019. *Rapport sur les objectifs de développement durable 2019 : The Future is now. Science for Achieving Sustainable Development*. New York, Organisation des Nations Unies. https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/24797GSDR_report_2019.pdf
- Paul, A. 2016. India's urbanization is like a revolution: McKinsey's Jonathan Woetzel. *LiveMint*, 19 août. www.livemint.com/Companies/RwcvV8fmZJkAOljuywbk/Indias-urbanization-is-like-a-revolution-McKinseys-Jonath.html
- Programme mondial de l'UNESCO pour l'évaluation des ressources en eau (WWAP). 2019. *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2019. ne laisser personne pour compte*. Programme mondial de l'UNESCO pour l'évaluation des ressources en eau. Paris, Éditions UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367305>
- RAEng. 2020. *Global Engineering Capability Review*. Londres, Académie royale d'ingénierie. <https://www.raeng.org.uk/publications/reports/global-engineering-capability-review>
- Sawahel, W. 2018. Practice-oriented German universities reach Africa. *University World News*, 13 novembre. www.universityworldnews.com/post.php?story=20181113091432460
- UNESCO. 2010. *Engineering: Issues, challenges and opportunities for development*. Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture. Paris, Éditions UNESCO.
- UNESCO. 2018. Telling SAGA: améliorer l'évaluation et les politiques pour l'égalité des genres dans les sciences, la technologie et l'innovation (STI). Document de travail n° 5 de SAGA. Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture. Paris, Éditions UNESCO.
- UN-GGIM. 2018. *Integrated Geospatial Information Framework*. Comité d'experts des Nations Unies sur la gestion de l'information géospatiale à l'échelle mondiale et la Banque mondiale. <https://ggim.un.org/meetings/GGIM-committee/8th-Session/documents/Part%201-IGIF-Overarching-Strategic-Framework-24July2018.pdf>
- Wijeratne, D., Rathbone, M. et Lyn. F. 2017. *Repaving the ancient Silk Routes*. PwC Growth Markets Centre. www.pwc.com/gx/en/growth-markets-centre/assets/pdf/pwc-gmc-repaving-the-ancient-silk-routes-web-full.pdf

Tableau 1. Ingénierie et Objectifs de développement durable des Nations Unies

ODD 1



L'ingénierie peut permettre de lutter contre l'extrême pauvreté urbaine. © Marlene Kanga

Comment l'ingénierie peut les réaliser

L'ingénierie stimule la croissance économique et atténue la pauvreté. Le développement d'infrastructures de base telles que des routes, chemins de fer, télécommunications, etc., stimule les économies modernes. Cependant, il reste beaucoup de travaux d'ingénierie à entreprendre pour développer les technologies qui permettent d'améliorer des services de base comme l'accès à une eau propre et à l'assainissement, à des énergies fiables et à des combustibles de cuisson propres (SDG Tracker)²⁰. Etant donné le coût élevé des approches traditionnelles de développement de ces infrastructures, les ingénieurs développent des approches innovantes et de nouvelles technologies pour relever ces défis (voir ODD 6 : Eau propre et assainissement et ODD 7 : Énergie propre et d'un coût abordable).

Outre les services de base, de nombreuses personnes provenant de pays à revenu faible exigent un accès aux dernières technologies. L'innovation frugale permet de développer des technologies économes et fiables qui sont accessibles aux utilisateurs à revenu faible (Chabba et Raikundalia, 2018). En Inde par exemple, plus de 100 millions d'utilisateurs à revenu faible, surtout dans les zones rurales, ont accès à des téléphones portables qui coûtent moins de 25 dollars des États-Unis.

Ces appareils améliorent nettement la communication, et permettent aux utilisateurs de mieux gérer leur travail, la production de leurs exploitations agricoles et leurs finances (LiveMint, 2019).

Les ingénieurs ont, en Inde, permis l'accès à du personnel et des moyens de transport familiaux à faible coût, des ressources qui sont déterminantes pour renforcer la productivité. La voiture Tata Nano a été une grande avancée pour le transport à faible coût : elle contient de nombreuses innovations et pèse seulement 600 kg. Les ingénieurs continuent d'innover dans ce domaine en développant des véhicules électriques et à énergie solaire. Ces innovations à faible coût ont des effets indirects majeurs, et encouragent l'entrepreneuriat et le développement de petites entreprises qui créent de l'emploi.

ODD 2



Mécanisation de l'agriculture grâce à l'ingénierie pour la production alimentaire en Inde. © Marlene Kanga

Comment l'ingénierie peut les réaliser

L'ingénierie a déjà automatisé la production agricole et alimentaire et renforcé la productivité grâce à l'utilisation de fertilisants et de pesticides. Ces progrès sont le fruit du travail des ingénieurs agricoles, mécaniciens et chimiques.

Les futures innovations technologiques des ingénieurs électroniciens et agricoles en faveur du développement durable comprennent des détecteurs automatiques pour l'humidité des sols et la surveillance des conditions afin d'optimiser l'utilisation des ressources en eau limitées et de fertilisants ; la robotique pour l'utilisation de pesticides et de fertilisants, ainsi que pour débroussailler et planter ; les technologies de communication pour la surveillance et les prévisions météorologiques, et pour prévenir en cas de catastrophe naturelle, ainsi que pour informer les exploitants agricoles sur les potentiels de récolte précis et actualisés, ce qui est crucial pour l'atteinte de la sécurité alimentaire dans le monde (GEO, 2020).

Le Réseau de systèmes d'alerte rapide aux risques de famine est un exemple de l'approche mondiale de l'amélioration de la sécurité alimentaire grâce à la technologie : c'est un réseau de technologies de surveillance et de télédétection par satellite et sur Terre, qui offrent une alerte rapide et une analyse de la sécurité alimentaire. Financé par l'Agence des États-Unis pour le développement international, il relie la National Aeronautics and Space Administration, la National Oceanic and Atmospheric Administration, le Département de l'agriculture des États-Unis et la United States Geological Survey.

La surveillance par satellite et sur le terrain ainsi que la gestion avancée des données sont utilisées pour suivre le climat et, par conséquent, la sécurité alimentaire, dans 34 pays d'Afrique et d'Asie, ce qui permet aux organismes humanitaires de prévoir les crises humanitaires et d'y répondre (FEWS)²¹.

Les technologies sont également utilisées par les ingénieurs pour aider les exploitants agricoles au niveau local. Par exemple, l'initiative FarmerLink est un service de conseils innovant sur téléphone portable à destination des exploitants agricoles : il relie les cultivateurs de noix de coco qui se trouvent en situation de pauvreté à un système d'alerte rapide et à des acheteurs sur le marché des Philippines, et offre un accès à une formation agricole essentielle et des services financiers (Gatti, 2018).

20 Le SDG Tracker sur « Pas de pauvreté » est disponible à l'adresse suivante : <https://sdg-tracker.org/no-poverty>

21 Site Web officiel du Réseau de systèmes d'alerte rapide aux risques de famine : <https://fews.net/sobre-n%C3%B3s>

ODD 3

3 BONNE SANTÉ
ET BIEN-ÊTRE

Vision de caméra d'intelligence artificielle pour la détection de cas de COVID-19 dans les foules.
© Marlene Kanga

Comment l'ingénierie peut les réaliser

L'ingénierie a amélioré la santé mondiale en éradiquant de nombreuses maladies telles que la typhoïde et le choléra grâce à un meilleur accès à l'eau et à l'assainissement. Les progrès de l'ingénierie biomédicale continuent d'améliorer la qualité de vie des personnes grâce à des appareils médicaux d'examen et des améliorations dans les domaines de l'audition, de la santé cardiaque et du fonctionnement cérébral. La robotique, la vision par ordinateur et l'intelligence artificielle permettront de favoriser les progrès dans le domaine de la santé.

Par exemple, les technologies de vision par ordinateur sont utilisées dans divers types de scanners, qui sont eux-mêmes le résultat de technologies de pointe, à des fins de diagnostic et de détection. L'intelligence artificielle et les mégadonnées sont utilisées pour analyser les tendances des données relatives à la santé, qui donnent de nouvelles perspectives sur les causes et le traitement des maladies. Des technologies avancées, telles que l'impression 3D, sont utilisées pour fabriquer des prothèses et d'autres parties du corps correspondant étroitement aux dimensions physiques d'un individu, ce qui en améliore le confort d'utilisation. Simultanément, le laser, la robotique et les caméras miniatures ont révolutionné les procédures chirurgicales.

Les ingénieurs de General Electric ont mis au point un électrocardiogramme à faible coût, qui est portable et peut être transporté dans les villages reculés. Il n'a besoin que d'une batterie, dispose d'une interface simple à deux boutons, ce qui réduit le besoin de formation, et coûte moins de 10 % du prix des appareils conventionnels utilisés dans les régions développées, permettant ainsi l'accès au diagnostic de santé dans les zones rurales des pays en développement (GEHealthcare, 2011 ; NESTA, 2019).

Le « pied de Jaipur »²², est une autre innovation à faible coût : c'est une prothèse à base de caoutchouc destinée aux personnes ayant subi une amputation au-dessous du genou. Cette invention permet à des milliers de personnes handicapées de devenir plus mobiles.

Healthcubed est une start-up qui offre un accès à des diagnostics médicaux à faible coût pour les maladies chroniques dans les pays en développement, en particulier dans les zones éloignées. Elle utilise des téléphones portables économiques, des analyses de données, stocke les données sur le cloud et permet d'y accéder afin d'aider les cliniciens à diagnostiquer des maladies telles que les maladies cardiaques, le diabète et d'autres maladies chroniques (HealthCubed)²³.

Les réponses de l'ingénierie pendant la période de confinement ont accéléré l'utilisation de la télésanté, ce qui a permis aux communautés reculées et rurales d'avoir accès aux services médicaux (Keshvaridoost, Bahaadinbeigy and Fatehi, 2020). Les ingénieurs biomédicaux accélèrent les méthodes de détection et de traitement du virus (Université de Washington, 2020), les ingénieurs développent des solutions de fabrication avancées et d'impression 3D pour les équipements de protection individuelle du personnel médical (Zhang, 2020), et l'intelligence artificielle est utilisée pour le développement de vaccins (Ross, 2020).

ODD 4

4 ÉDUCATION
DE QUALITÉ

Des jeunes femmes à l'école du développement durable. © FMOI

Comment l'ingénierie peut les réaliser

L'éducation à tous les niveaux – primaire, secondaire et tertiaire – est un agent fondamental de développement (Roser et Ortiz-Ospina, 2019). Les ingénieurs facilitent l'enseignement grâce à la création de nouvelles technologies telles que les outils d'apprentissage en ligne et les technologies fondées sur la communication rapide. Ces avancées améliorent l'accessibilité et réduisent les coûts pour les étudiants. L'une de ces technologies, le Wi-Fi, qui a été inventée par un ingénieur australien, John O'Sullivan, en 1977, est actuellement appliquée sur plus de 40 milliards d'appareils au monde. Elle favorise les progrès dans le domaine de l'éducation et rend possible l'existence de millions d'autres applications²⁴.

Les ingénieurs en logiciels et en télécommunications étendent rapidement l'accès à l'Internet et au monde de la connectivité grâce au développement rapide de satellites à faible coût et d'autres appareils aériens pour fournir des informations et services aux communautés reculées à revenu faible. L'accès à des technologies à faible coût telles que les tablettes « Aakash » ou « Ubislate », vendues à 35 dollars des États-Unis, permet au Gouvernement indien de relier 25 000 collèges et 400 universités à des programmes d'apprentissage en ligne. L'apprentissage en ligne contient de nombreux programmes d'enseignement provenant des meilleures universités au monde qui s'adressent aux pays les plus

pauvres (Datawind)²⁵.

L'intelligence artificielle est utilisée pour développer des « chatbots » qui répondront aux questions habituelles des étudiants, ce qui accélérera l'apprentissage. Les ingénieurs développent des systèmes d'apprentissage qui utilisent l'intelligence artificielle pour réaliser des progrès significatifs dans les méthodes conventionnelles d'enseignement, ce qui permet un contenu personnalisé et une instruction adaptée localement, tenant compte des questions de genre et de l'origine ethnique, dynamique et interactive. Ces technologies peuvent permettre de suivre les progrès en temps réel, d'anticiper les performances futures, de prendre des mesures correctives et d'appuyer les enseignants expérimentés, ce qui entraîne de meilleurs résultats d'apprentissage à un faible coût (Marr, 2018).

22 Plus d'informations sur le pied de Jaipur sont disponibles à l'adresse suivante : <https://www.jaipurfoot.org/how-we-do/technology.html>

23 Site Web officiel de Healthcubed : www.healthcubed.com

24 Plus d'informations sont disponibles à l'adresse suivante : <https://www.csiro.au/en/Research/Technology/Telecommunications/Wireless-LAN>

25 Plus d'informations sur Datawind, fabricant des tablettes Ubislate, sont disponibles à l'adresse suivante : www.datawind.com/about-datawind.html

Avec plus d'un milliard d'étudiants touchés dans le monde par les mesures de confinement et incapables de se rendre à l'école, les réseaux de télécommunication ont joué un rôle crucial dans le maintien des possibilités d'apprentissage pour tous ; c'est un changement de paradigme important qui aura des répercussions au-delà de 2020²⁶ (UNESCO, 2020).

ODD 5

5 ÉGALITÉ ENTRE LES SEXES



Femmes ingénieurs travaillant sur des systèmes électriques haute tension. © Chinese Society for Electrical Engineering

Comment l'ingénierie peut les réaliser

Garantir l'accès des femmes à la technologie et à l'ingénierie comblera de nombreuses lacunes en matière de genre et veillera à ce que les femmes bénéficient de la révolution technologique et y participent, et à ce qu'elles occupent des postes de direction (SDG Tracker)²⁷.

Le Conseil économique et social des Nations Unies a reconnu, dans une déclaration (ECOSOC, 2017) à la Commission de la condition de la femme, le potentiel transformateur des nouvelles technologies telles que l'automatisation avancée, les télécommunications, la robotique et l'impression 3D, pour le travail et la participation des femmes à la main-d'œuvre connectée.

La participation des femmes au développement de technologies de pointe, surtout à l'ingénierie, est cruciale pour réaliser les ODD. La diversité de pensée est vitale pour l'innovation et le développement de solutions qui reflètent les normes, valeurs et aspirations communautaires.

Reconnaissant cet impératif, les établissements professionnels d'ingénierie ont élaboré des approches stratégiques visant à renforcer la participation des femmes dans l'ingénierie (Diversity Agenda²⁸; Engineers Canada, 2019; Académie royale d'ingénierie²⁹). Il est prévu que des programmes révolutionnaires tels que WomEng attireront un million de filles dans les domaines des sciences, de la technologie, de l'ingénierie et des mathématiques d'ici à 2027. Ces programmes ont un impact particulièrement important en Afrique (WomEng³⁰, 2019). D'autres programmes ont présenté les réalisations des femmes en tant que leaders, et des stratégies visant à changer la culture du travail pour renforcer l'inclusion dans la profession (IFEES, 2019; Kanga, 2014).

Des technologies nouvelles, développées par les ingénieurs, autonomisent de plus en plus les femmes qui les utilisent. Par exemple, les communications mobiles et l'Internet ont favorisé l'accès aux services bancaires, financiers et d'information dans différents secteurs et à différents niveaux de revenus. Dans de nombreux pays, ces nouvelles technologies et ces nouveaux systèmes de communication ont appuyé le développement de l'entrepreneuriat parmi les femmes, en particulier les petites entreprises. Offrir aux femmes un accès à l'Internet favorisera le flux d'informations dans des domaines comme la santé, l'éducation et la puériculture, ce qui entraînera de meilleurs résultats. D'autres nouvelles technologies telles que les systèmes biométriques garantiront la sécurité personnelle des femmes, les doteront des capacités à posséder des terres et des actifs, leur permettront d'accéder à des antécédents scolaires et médicaux personnels exacts, et les aideront à devenir des participantes actives des systèmes financiers.

ODD 6

6 EAU PROPRE ET ASSAINISSEMENT



Technologies d'ingénierie avancées utilisant le balayage au laser pour la surveillance du barrage de Cahora Bassa au Mozambique, l'un des plus grands du monde. © Antonio Berberan, Eliane Portela and João Boavida

Comment l'ingénierie peut les réaliser

Les ingénieurs civils et environnementaux ont sauvé des milliards de vies grâce à des technologies conçues pour offrir de l'eau propre et traiter les eaux usées. Ces progrès ont déjà permis d'éradiquer de nombreuses maladies transmises par l'eau dans les régions développées, telles que le choléra et la typhoïde. Les ingénieurs électriciens et mécaniciens continuent de faire en sorte que ces systèmes fonctionnent de manière fiable partout dans le monde. Les innovations les plus récentes en matière de traitement des eaux et de recyclage garantissent l'eau propre pour tous, même dans les régions arides. Cependant, plus d'un milliard de personnes manquent toujours d'accès à une eau propre, et deux milliards de personnes n'ont pas accès à l'assainissement de base (SDG Tracker³¹). Des mesures urgentes, y compris celles prises par les ingénieurs, sont nécessaires pour pallier cette difficulté.

De nouveaux systèmes remplacent les approches traditionnelles axées sur les projets en ce qui concerne les services d'eau et d'assainissement. Par exemple, Agenda for Change fournit des services d'eau et d'assainissement grâce à des partenariats entre plusieurs organismes non gouvernementaux (voir ODD 17. Partenariats), ce qui favorise une approche systémique nationale et locale pour des services économiques et durables (WASH Agenda for Change)³².

Les ingénieurs développent également de nouvelles technologies faisant appel à des capteurs intelligents qui permettent d'évaluer l'état des eaux souterraines et ils réalisent des progrès dans l'utilisation de cadres organiques en métal pour des systèmes de purification des eaux utilisant peu d'énergie. Au niveau local, l'entreprise Banka BioLoo, dirigée par des femmes, a adopté une approche durable à petite échelle pour éliminer la défécation à l'air libre et gérer les déchets biomédicaux (Banka BioLoo)³³.

26 Pour en savoir plus sur la Coalition mondiale pour l'éducation de l'UNESCO en réponse à la COVID-19, aller à l'adresse suivante : <https://iite.unesco.org/news/global-education-coalition-for-covid-19-response>

27 Le SDG Tracker sur « Genre » est disponible à l'adresse suivante <https://sdg-tracker.org/gender-equality>

28 Site Web officiel de Diversity Agenda : www.diversityagenda.org, Engineering New Zealand

29 Voir le site Web de l'Académie royale d'ingénierie sur la diversité et l'inclusion www.raeng.org.uk/policy/diversity-in-engineering

30 Site Web officiel de WomEng : www.womeng.org

31 Le SDG Tracker sur « Eau » est disponible à l'adresse suivante : <https://sdg-tracker.org/water-and-sanitation>

32 Site Web officiel de WASH Agenda for Change : www.washagendaforchange.net

33 Plus d'informations sur Banka BioLoo sont disponibles à l'adresse suivante : www.bankabio.com

Les effets des changements climatiques exigeront des systèmes de gestion intégrée de l'eau qui comprendront des solutions d'ingénierie, durables, tant dans les pays développés que dans les pays en développement, et surtout dans les zones arides. Le système espagnol de gouvernance de l'eau, par exemple, est conçu pour s'adapter à l'environnement en utilisant un système fondé sur la planification, la participation publique et privée, ainsi que le développement et l'innovation technologiques opérés par les ingénieurs (MAPAMA, 2014).

La Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs collabore avec des ingénieurs du monde entier pour adopter des approches de gestion intégrée des ressources en eau et des bassins hydrographiques, de développement et d'adaptation d'infrastructures durables, de modélisation hydrologique aux fins de la planification et d'adaptation aux effets des changements climatiques (FMOI, 2018a).

ODD 7



Les ingénieurs sont essentiels pour la conception, la construction et l'entretien d'infrastructures d'énergie. © Chinese Society for Electrical Engineering

Comment l'ingénierie peut les réaliser

L'électricité est essentielle pour la croissance économique et l'amélioration des conditions de vie. Pourtant, près d'un milliard de personnes, surtout en Afrique subsaharienne et en Asie du Sud, manquent toujours d'accès à des sources d'électricité fiables (Ritchie et Roser, 2019).

Les ingénieurs électriciens, mécaniciens et environnementaux sont fondamentaux pour le développement de solutions d'énergie renouvelable à faible coût, notamment l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie hydraulique ou l'énergie géothermique, qui offrent toutes l'accès à l'électricité dans les régions reculées tout en atténuant les effets des changements climatiques. Par exemple, le développement de cellules photovoltaïques qui convertissent la lumière du soleil en électricité a permis le développement des panneaux solaires : une source d'énergie sûre, fiable et économique. Aujourd'hui, 20 % de la population mondiale a accès à l'énergie solaire, ce qui permet ainsi de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Cette solution est de plus en plus une source d'énergie essentielle au sein des économies développées et en développement (Amelang, 2018 ; PNUD³⁴).

L'électricité des ménages, l'électricité distribuée, les mini-réseaux et les réseaux intelligents sont des innovations développées par les ingénieurs électriciens, électroniciens, mécaniciens et en télécommunications qui transforment l'accès à l'énergie tout en atténuant ses conséquences environnementales. Les avancées en matière de stockage d'énergie rendent les sources d'énergie fiables accessibles et abordables. La Banque mondiale favorise par exemple l'offre d'énergie solaire en Afrique par le biais de l'éducation des consommateurs, de l'assurance de la qualité des produits et de financements pour les consommateurs (Lighting Africa)³⁵.

L'accès à une énergie renouvelable propre soutient également l'agriculture par l'intermédiaire de l'utilisation de pompes d'irrigation, permet la réfrigération aux fins de l'alimentation et de la médecine, et permet de faire fonctionner des appareils ménagers, comme les télévisions et les réfrigérateurs. La mise en œuvre réussie de technologies solaires à faible coût et accessibles dans les pays en développement, en particulier dans les zones rurales, a un impact important sur le tissu social et les économies de ces pays.



ODD 8



L'ingénierie dans le secteur des transports est essentielle à la croissance économique, et pour des villes durables. © Marlene Kanga

Comment l'ingénierie peut les réaliser

Près de la moitié de la population mondiale vit avec moins de 2 dollars des États-Unis d'Amérique par jour, et l'accès à un travail stable reste incertain (SDG Tracker, 2019).

Les pays développés ont bénéficié de progrès importants pour leur prospérité économique, rendus possibles grâce aux innovations d'ingénierie de la révolution industrielle. L'ingénierie est maintenant reconnue comme un agent essentiel de la croissance économique. Par ailleurs, un rapport récent du Centre for Economics and Business Research pour l'Académie royale d'ingénierie a montré la relation positive, partout dans le monde, entre la croissance économique et le nombre d'ingénieurs dans un pays donné (CEBR, 2016).

Les routes, les chemins de fer, les aéroports, l'approvisionnement en eau et en électricité et les télécommunications sont des infrastructures essentielles qui soutiennent les économies. Toutes ces infrastructures sont conçues, développées et entretenues par les ingénieurs civils, mécaniciens, électriciens et environnementaux. L'eau propre, l'énergie et le logement sont des commodités de base, également développées par les ingénieurs, qui permettent aux citoyens de rester en bonne santé, de mener ainsi des vies productives, et d'avoir des emplois décents. La Banque mondiale estime dans un rapport récent que près de 4,5 % du PIB est nécessaire dans les pays à revenu intermédiaire et faible pour répondre au manque d'infrastructures. Ce manque ne se rapporte pas seulement aux nouvelles infrastructures : elle concerne aussi les infrastructures existantes, qui doivent être entretenues aux fins du développement durable. C'est le travail fondamental des ingénieurs et des techniciens (Rozenberg et Fay, 2019).

Les ingénieurs doivent également contribuer à la diversification des économies nationales et à la création de nouvelles possibilités d'emploi (ODD 8.2), ainsi qu'au développement de nouvelles technologies et innovations permettant de créer des emplois dans de nouveaux domaines industriels tout en gérant l'utilisation de ressources : un objectif fondamental pour réaliser le développement durable (ODD 8.4). La construction et l'entretien des infrastructures sont une source d'emplois dans de nombreux pays en développement. Des projets d'énergie renouvelable ont par exemple entraîné de plus importantes possibilités d'emploi en Afrique et en Asie (IRENA, 2018).



34 Les faits et les chiffres du PNUD sur l'Objectif 7 : Énergie propre et d'un coût abordable sont disponibles à travers le lien suivant : <https://www.undp.org/content/undp/fr/home/sustainable-development-goals/goal-7-affordable-and-clean-energy.html>

35 Site Web officiel de Lighting Africa : www.lightingafrica.org

ODD 9



Des élèves mettant au point des innovations dans l'ingénierie des procédés chimiques. © Technische Hochschule Georg Agricola (THGA)

Comment l'ingénierie peut les réaliser

Une économie moderne ne peut exister sans ingénierie. L'Organisation des Nations Unies a reconnu que l'amélioration de la productivité, des revenus, de la santé et des résultats de l'éducation exige d'investir dans les infrastructures (ONU, 2019).

Les ingénieurs sont chargés de la conception, de la construction et de l'entretien des infrastructures. Les routes, le transport, la communication, l'approvisionnement en eau et l'énergie sont tous le résultat du travail des ingénieurs civils, mécaniciens et électriciens. Le défi, pour les ingénieurs, est de développer des infrastructures durables, résilientes et inclusives, surtout dans les pays exposés aux effets néfastes des changements climatiques (voir ODD 13 : Mesures pour lutter contre le changement climatique).

Les infrastructures permettent à l'industrie de se développer et de prospérer. L'industrie a également besoin d'ingénieurs de tous types dans des domaines comme l'exploitation minière, pétrolière, chimique et le traitement des produits alimentaires. Les ingénieurs : mécaniciens, électriciens, chimistes et environnementaux, sont à la base de chaque type de fabrication. Les avancées industrielles dans ces secteurs entraînent davantage de recrutements et la production de biens à destination des marchés domestiques et d'exportation. Les infrastructures construites par les

ingénieurs facilitent également le commerce grâce au développement de routes et de chemins de fer transfrontières, ainsi que de ports et d'aéroports.

Il existe une corrélation positive entre le nombre d'ingénieurs dans un pays et les capacités d'innovation et de production de ce dernier (Maloney et Caicedo, 2014).

L'ingénierie est également une source d'innovation. Le développement de nouvelles industries et les investissements dans la recherche et le développement sont un objectif important (voir ODD 9.5). Les innovations en matière d'intelligence artificielle, de robotique, d'informatique en nuage et de mégadonnées apparaissent rapidement ; elles stimuleront la future croissance économique et l'emploi. L'intelligence artificielle transforme par exemple les soins de santé, en offrant des perspectives dans le domaine de la gestion de maladies chroniques telles que l'asthme. Elle permet également : i) de surveiller les activités frauduleuses dans le domaine financier ; ii) de diriger la logistique et les véhicules autonomes dans le domaine de l'expédition et du transport ; et iii) d'élaborer des programmes spécifiques aux étudiants dans le domaine de l'éducation. La robotique est utilisée dans de nombreuses industries en ce qui concerne les tâches répétitives ou dangereuses, ou lorsqu'une grande précision est requise, comme lors des procédures chirurgicales. Les nouvelles technologies créeront de nouvelles industries et de nouveaux emplois. Elles permettent également à des millions de personnes supplémentaires d'adopter une mentalité entrepreneuriale et créative au travail.

ODD 10



L'ingénierie génère des emplois et des revenus. © Ingénieurs et Scientifiques de France

Comment l'ingénierie peut les réaliser

Les inégalités mondiales relatives aux revenus, à la santé, à l'éducation et à l'appropriation des actifs restent un objectif important pour le développement durable, qui vise à ne faire aucun laissé-pour-compte (SDG Tracker)³⁶. Les ingénieurs et l'ingénierie jouent un rôle crucial dans la réduction des inégalités grâce au développement des infrastructures (voir ODD 8 : Travail décent et croissance économique) et aux nouvelles technologies et innovations (voir ODD 9 : Industrie, innovation et infrastructure) qui créent des emplois et offrent des possibilités à tous. Ces résultats permettent d'accéder au logement, à la nourriture, à la santé et à une vie décente pour tous.

Il est capital de veiller à ce que les dernières innovations soient accessibles, en particulier dans les pays à revenu faible, afin de réduire les inégalités dans le monde. Cela comprend l'accès à : i) des communications et des téléphones portables à faible coût ; ii) l'information et à l'éducation par l'intermédiaire d'appareils portables ; iii) des diagnostics médicaux et des traitements à faible coût³⁷ (voir ODD 3. Bonne santé et bien-être) ; iv) des systèmes nationaux de données et d'identité qui permettent la protection des actifs (*The Economist*, 2017).

Les appareils ménagers à énergie solaire et les systèmes de réfrigération à faible coût font partie des technologies qui autonomisent les femmes, renforcent leur participation à la main-d'œuvre et luttent contre les inégalités économiques chroniques fondées sur le genre. Citons par exemple le réfrigérateur « Chotukool », qui coûte 69 dollars des États-Unis et garde la nourriture au frais, ce qui permet aux femmes de passer plus de temps à entreprendre des activités économiques (WIPO, 2013).

Les systèmes de paiement mobile sont un autre exemple de technologies développées par les ingénieurs. En Afrique par exemple, le système de transfert d'argent sur mobile « M-Pesa », permet de faire des transactions financières, même pour les individus ne disposant pas de compte bancaire (Safaricom)³⁸.

36 Le SDG Tracker sur « Inégalités » est disponible à l'adresse suivante : <https://sdg-tracker.org/inequality>

37 Voir NESTA UK (National Endowment for Science Technology and Arts) pour des exemples sur les innovations frugales telles que l'électrocardiographe GE sur <https://www.nesta.org.uk/feature/frugal-innovations/ge-ecg-machine>

38 Vous pouvez en savoir plus sur M-Pesa Tips à travers le lien suivant : www.safaricom.co.ke/personal/m-pesa/getting-started/m-pesa-tips

ODD 11



Les infrastructures d'ingénierie, à l'exemple de ce tunnel de métro souterrain, sont essentielles au développement durable. © Mr Pung Chun Nok, Hong Kong Institution of Engineers

Comment l'ingénierie peut les réaliser

Plus des deux tiers de la population mondiale vivront dans les villes d'ici à 2050. Le développement de villes sûres, inclusives et résilientes constitue donc un ODD fondamental (SDG Tracker)³⁹.

L'accès à un logement abordable et au transport public est une priorité dans les pays développés et en développement. D'autres éléments sont également impératifs pour les villes : air pur, eau et énergie, protection du patrimoine naturel et culturel, résilience face aux catastrophes naturelles (SmartCitiesWorld, 2018).

Les ingénieurs civils, structurels, électriciens, mécaniciens, environnementaux, en logiciels et en télécommunications ont un rôle important à jouer en ce sens qu'ils doivent accompagner les dirigeants et les personnes chargées de la planification pour concevoir et développer des villes où il fait bon vivre, qui sont durables et résilientes. Les ingénieurs et l'ingénierie sont d'une importance capitale pour les villes intelligentes et durables qui intègrent l'efficacité énergétique aux bâtiments, et se servent de l'éclairage intelligent, de systèmes de transport efficaces, de sources d'énergie renouvelable et gèrent les ressources en eau de manière efficace. Par exemple, l'Inde construit actuellement 100 villes intelligentes⁴⁰, prêtes d'ici à 2022, qui exigeront toutes l'ingénierie pour trouver des solutions durables. Les villes collaborent également pour partager les meilleures pratiques, par exemple grâce au réseau Resilient Cities⁴¹.

Des technologies de pointe sont utilisées par les ingénieurs pour atteindre de nombreux objectifs qui permettront de développer des villes durables. L'ingénierie géospatiale, la modélisation des données du bâtiment et l'analyse des données peuvent par exemple être utilisées dans les villes intelligentes pour rendre plus efficaces et durables les systèmes de transport (Massoumi, 2018 ; FMOI, 2020a).

L'ampoule LED bleue inventée par les ingénieurs et les scientifiques est un des nombreux exemples d'inventions ayant significativement réduit les émissions de gaz à effet de serre. Ces ampoules, peu coûteuses en énergie, sont maintenant installées dans les villes du monde entier, notamment dans la ville de Bhubaneswar en Inde, car elles sont économiques, de faible consommation, durables, et améliorent la sûreté et la sécurité des citoyens (Ramanath, 2017).

ODD 12



Utilisation du biogaz issu de boues traitées pour produire de l'électricité à l'usine de traitement des eaux usées de North Head à Sydney en Australie. © Marlene Kanga

Comment l'ingénierie peut les réaliser

Les ingénieurs des mines, civils, mécaniciens, électriciens et environnementaux jouent un rôle crucial dans la gestion efficace des ressources, notamment l'activité minière, le traitement de minéraux essentiels, la génération d'énergie à partir de ressources renouvelables, la garantie de l'utilisation efficace des ressources en eau, la production agricole et la gestion de la biodiversité.

Les ingénieurs développent des solutions de gestion des ressources et de consommation responsable grâce au concept d'économie circulaire, selon lequel les résultats et produits peuvent devenir la base d'autres processus et produits, conservant ainsi les ressources de la Terre (TNO)⁴².

Des innovations technologiques ont vu le jour pour recycler ou réutiliser les déchets. Par exemple, la société EcoPost, basée au Kenya, recycle les déchets plastiques urbains en bois plastique pouvant servir par exemple à fabriquer des clôtures, de la signalisation de routes et des meubles d'extérieur. Cette innovation crée des emplois, réduit la déforestation et aide à lutter contre les changements climatiques. Les ingénieurs chimiques développent également des solutions technologiques pour faire en sorte que les produits plastiques soient plus recyclables et réutilisables en modifiant la structure moléculaire des composants chimiques, ce qui permet leur réutilisation en tant que nouveaux produits (Lozkowski, 2018).

Dans le domaine de l'eau, les technologies sont déjà utilisées pour gérer et traiter les flux d'eaux usées pour les réutiliser à des fins d'irrigation et comme eau potable.

Aujourd'hui, des milliards de téléphones portables, d'ordinateurs personnels et de tablettes sont utilisés. Il devient donc important de traiter les déchets d'équipements électriques et électroniques pour gérer les ressources. Les ingénieurs ont élaboré des processus visant à extraire des métaux de ces déchets, qui pourront alors être recyclés dans d'autres produits (Strom, 2016). Une autre entreprise a fabriqué une machine à impression 3D à partir de composantes hors d'usage trouvés dans des dépôts de déchets d'équipements électriques et électroniques (Ungerleider, 2013).

Des technologies visant à extraire de l'énergie de la biomasse, ce qui permet également de réduire l'émission des gaz à effet de serre, gagnent de plus en plus du terrain (Scallan, 2020).

39 Le SDG Tracker sur « Villes » est disponible à l'adresse suivante : <https://sdg-tracker.org/cities>

40 Plus d'informations sur Smart Cities Mission sont disponibles à l'adresse suivante : www.smartcities.gov.in

41 Site Web officiel du réseau Resilient Cities : <https://resilientcitiesnetwork.org>

42 Pour en savoir plus sur l'article The circular economy: the basis for a sustainable society, de l'Organisation néerlandaise pour la recherche scientifique appliquée, cliquer sur <https://www.tno.nl/en/focus-areas/circular-economy-environment/roadmaps/circular-economy>

ODD 13

13 MESURES RELATIVES
À LA LUTTE CONTRE
LES CHANGEMENTS
CLIMATIQUES



La brume de fumée des feux de brousse, résultant des changements climatiques, pollue la ville de Sydney - janvier 2020. © Marlene Kanga

Comment l'ingénierie peut les réaliser

Les ingénieurs sont au premier rang de la lutte contre les changements climatiques grâce au développement d'un large éventail de technologies visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre, en particulier celles provenant de la génération d'énergie, à éliminer le gaz à effet de serre de l'atmosphère et à atténuer les effets des changements climatiques grâce au développement d'infrastructures résilientes.

Les ingénieurs ont développé de nouvelles technologies pour trouver des sources d'énergie alternatives qui n'émettent pas d'émissions de carbone, y compris l'énergie provenant de centrales hydroélectriques ou l'énergie solaire, éolienne ou des vagues. La fission nucléaire est également une technologie bien établie. Les ingénieurs s'efforcent maintenant d'accéder aux remarquables quantités d'énergie solaire disponibles dans l'espace, qui sont déjà utilisées pour faire fonctionner les stations spatiales⁴³.

Les ingénieurs élaborent plusieurs stratégies et technologies pour éliminer les gaz à effet de serre. Le captage du carbone peut être renforcé grâce au reboisement et à la restauration des habitats, au changement des pratiques agricoles telles que le travail du sol et la rotation des cultures afin d'augmenter le taux de carbone dans les sols, et à l'ajout de biocharbon aux sols. Le captage et le stockage souterrain du carbone, de même que la transformation des biosolides en gaz, sont des processus adoptés partout dans le monde. Les méthodes utilisées pour absorber le carbone provenant de l'atmosphère comprennent la fertilisation des océans (pour augmenter le taux de photosynthèse au sein de ceux-ci) et la construction à l'aide de bois d'œuvre grâce aux projets de reforestation rapide. L'utilisation de béton faible en carbone pour la construction est un autre exemple de la technologie disponible aujourd'hui (RAEng, 2018).

Les technologies futures utilisent de nouveaux matériaux pour absorber le dioxyde de carbone, tels que les cadres organiques en métal qui permettent de stocker de bien plus petits volumes que les méthodes de stockage conventionnelles (Zhao *et al.*, 2016).

Le traitement chimique visant à éliminer le carbone dans l'air afin de l'utiliser comme matière première est une nouvelle technologie développée par les ingénieurs chimiques. Les ingénieurs dirigent également des recherches collaboratives sur les villes à faible teneur en carbone, axées sur les matériaux de fabrication et de construction, l'énergie et l'utilisation de l'eau et les technologies de transport intelligent (Low Carbon Living CRC)⁴⁴.

Les ingénieurs sont chargés de concevoir, construire et entretenir les infrastructures essentielles des villes, telles que le transport, l'eau et l'énergie, et les systèmes de communication. Intégrer les principes de résilience face aux effets des changements climatiques peut avoir des avantages économiques et sociaux importants et permettre un relèvement plus rapide après des catastrophes naturelles comme les cyclones et les inondations, qui se produisent de plus en plus avec les changements climatiques (OCDE, 2018).

En 2015, le Comité sur l'ingénierie et l'environnement de la Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs a élaboré un guide à destination des ingénieurs, intitulé *Model Code of Practice: Principles of Climate Change Adaptation for Engineers*, qui concerne les principes fondamentaux servant à développer les infrastructures résilientes face aux catastrophes naturelles et permettant d'atténuer les effets des changements climatiques (FMOI, 2015). En pleine pandémie de COVID-19, la FMOI a réitéré l'appel du Secrétaire général de l'ONU à « reconstruire en mieux », afin d'accélérer l'atténuation des effets des changements climatiques grâce aux solutions d'ingénierie (FMOI, 2020b).

ODD 14



L'ingénierie est nécessaire pour une protection contre l'élévation du niveau de la mer et la montée de l'érosion des plages dans les communautés côtières. © Marlene Kanga

Comment l'ingénierie peut les réaliser

Les océans sont une ressource vitale de la planète. Ils permettent l'approvisionnement en eau ainsi qu'en fruits de la mer et offrent des voies de transport, tout en régulant le climat. Au rang des missions capitales des ingénieurs, figurent la préservation et la protection des océans et des mers, ainsi que celle de la vie marine.

Les ingénieurs marins collaborent avec des scientifiques et d'autres disciplines de l'ingénierie pour mettre en œuvre des solutions visant à lutter contre la dégradation de la pêche, la pollution des océans et l'utilisation des ressources, notamment l'énergie des vagues ainsi que l'exploration pétrolière et gazière.

Les ingénieurs travaillent par exemple actuellement sur un projet de nettoyage de la plaque de déchets du Pacifique Nord⁴⁵, qui comprend près de 80 000 tonnes de déchets plastiques. Ces déchets sont non seulement lents à se dégrader, mais se transforment en microplastiques qui sont dangereux pour la vie marine, la privent de nourriture et provoquent des emmêlements, ce qui affecte par la suite la chaîne alimentaire des personnes. Les ingénieurs sont chargés d'analyser ces matériaux plastiques et de développer une solution viable, un travail déterminant pour réussir à nettoyer les océans.

Le document intitulé *The Reef 2050 Long Term Sustainability Plan* de Great Barrier Reef⁴⁶ présente des mesures et résultats clairs pour gérer le récif, et aborde les impacts cumulés, notamment des menaces comme les changements climatiques.

43 Voir par exemple la National Space Society du Royaume-Uni sur l'énergie solaire spatiale à l'adresse suivante : <https://space.nss.org/space-solar-power>

44 Pour en savoir plus sur Low Carbon Living Co-operative Research Centre (CRC), Australie, cliquer sur <http://www.lowcarbonlivingcrc.com.au/>

45 Plus d'informations sur les réalisations de Ocean CleanUp 2019 et de la plaque de déchets du Pacifique Nord sont disponibles à l'adresse suivante : www.theoceancleanup.com/great-pacific-garbage-patch

46 Plus d'informations sur le document intitulé Reef 2050 Long-Term Sustainability Plan sont disponibles à l'adresse suivante : www.environment.gov.au/marine/gbr/publications/reef-2050-long-term-sustainability-plan-2018

L'Institut australien des sciences de la mer (AIMS)⁴⁷ élabore des solutions d'ingénierie, notamment l'ombrage du récif, ainsi que des robots aériens et sous-marins pour renforcer la surveillance et la protection.

ODD 15

15 VIE TERRESTRE



L'innovation en géo-ingénierie est essentielle pour la découverte et la protection des ressources de la terre. © Technische Hochschule Georg Agricola (THGA)

Comment l'ingénierie peut les réaliser

La protection des forêts, qui recouvrent 30 % de la surface de la planète, est vitale pour lutter contre les changements climatiques et protéger la biodiversité, aussi bien la faune que la flore, prévenir la désertification et garantir l'approvisionnement en nourriture (SDG Tracker)⁴⁸.

Les ingénieurs constituent un maillon important pour la gestion de la biodiversité grâce à l'utilisation responsable des ressources forestières et la préservation des habitats pour atténuer l'impact des industries dangereuses. Les ingénieurs ont également développé des technologies innovantes pour cartographier la surface de la Terre. Celles-ci offrent des informations géospatiales précieuses qui peuvent être utilisées pour la surveillance agricole, la conception d'infrastructures et la prévision de catastrophes naturelles telles que les séismes.

Citons par exemple le développement de systèmes d'informations géographiques participatifs et la modélisation en 3D par le Centre technique de coopération agricole et rurale ACP-UE (CTA). Cet outil est un moyen efficace pour les groupes défavorisés, notamment les communautés autochtones, de renforcer leurs capacités de cartographie, d'analyse et de négociation pour le développement approprié et durable de leurs ressources tout en protégeant les forêts naturelles. Ces outils ont été utilisés efficacement en Afrique, dans les Caraïbes et dans les îles du Pacifique Sud (CTA, 2016).

Les capteurs et les drones sont utilisés pour repérer les populations d'animaux menacés d'extinction. Le séquençage de l'ADN est également utilisé pour suivre les animaux à partir d'échantillons d'eau dans les habitats connus. La surveillance de l'ornithorynque en Australie en est un exemple (CESAR)⁴⁹.

Le projet intitulé International Meridian Circle Project montre la collaboration entre les ingénieurs en Chine, Pologne et Fédération de Russie. Il utilise des informations satellites pour surveiller la Terre et offre une alerte rapide concernant les séismes (NSSC, 2017).

ODD 16

16 PAIX, JUSTICE ET INSTITUTIONS EFFICACES



Réunions de l'International Engineering Alliance.
© Marlene Kangra

Comment l'ingénierie peut les réaliser

La promotion de la paix, de la justice et de sociétés inclusives grâce à la bonne gouvernance et à des institutions efficaces est une priorité pour tous, notamment pour les ingénieurs.

La pratique de l'ingénierie implique l'adoption de valeurs de diversité et d'inclusion, de pratiques durables et d'une ingénierie éthique, qui sont essentielles pour appliquer des solutions d'ingénierie sûres et durables. Les ingénieurs collaborent également pour développer des institutions efficaces en vue de l'enseignement, de l'accréditation et de la réglementation de l'ingénierie, qui sont cruciaux pour garantir la compétence des ingénieurs partout dans le monde. Par exemple, la FMOI collabore avec l'International Engineering Alliance et ses pairs dans le domaine de l'ingénierie internationale pour veiller à ce que les normes d'enseignement de l'ingénierie pour les diplômés de demain reflètent les valeurs d'une ingénierie durable, éthique et inclusive. Ces organisations œuvrent également en partenariat pour mettre en place des institutions d'accréditation efficaces et réglementer les systèmes universitaires d'enseignement ainsi que les établissements professionnels d'ingénierie, en vue d'appuyer le développement professionnel des ingénieurs (FMOI, 2018b).

La FMOI a élaboré un modèle de code d'éthique à destination des ingénieurs (FMOI, 2010) qui a servi de base aux codes d'éthique élaborés par d'autres établissements professionnels d'ingénierie, tels que Engineers Australia (Engineers Australia, 2019).

Le Comité de lutte contre la corruption de la FMOI⁵⁰ a établi des partenariats avec d'autres organisations internationales comme l'OCDE et le World Justice Project pour promouvoir des cadres permettant de lutter contre la corruption dans l'ingénierie, en vue d'optimiser le bénéfice des investissements dans les infrastructures visant le développement durable. Il fait partie du comité technique TC-309 de l'Organisation internationale de normalisation qui a élaboré la norme ISO 37001 Anti-corruption et la norme ISO 37000 pour la gouvernance des organisations, qui seront publiées en début 2021 (ISO, 2016 ; FMOI, 2020c).

Le Global Infrastructure Anti-Corruption Centre⁵¹, basé au Royaume-Uni, est une organisation indépendante à but non lucratif qui propose des ressources visant à mieux comprendre, repérer et prévenir la corruption au sein des domaines des infrastructures, de la construction et de l'ingénierie.

47 Site Web officiel de l'Institut australien des sciences de la mer : www.aims.gov.au

48 Le SDG Tracker sur « Biodiversité » est disponible à l'adresse suivante : <https://sdg-tracker.org/biodiversity>

49 Plus d'informations sur le Centre for Environmental Stress and Adaptation Research (CESAR) sont disponibles à l'adresse suivante : <http://cesaraustralia.com/biodiversity-conservation/environmental-dna-edna>

50 Plus d'informations sur le Comité de lutte contre la corruption de la FMOI sont disponibles à l'adresse suivante : www.wfeo.org/committee-anti-corruption ; www.wfeo.org/committee-anti-corruption

51 Site Web officiel du Global Infrastructure Anti-Corruption Centre <https://giacentre.org>

SDG 17

17 PARTENARIATS
POUR
LA RÉALISATION
DES OBJECTIFS



Les états membres de l'UNESCO examinent la déclaration du 4 mars comme Journée mondiale de l'Ingénierie pour le développement durable.

© Marlene Kanga

Comment l'ingénierie peut les réaliser

Les partenariats, dans le domaine de l'ingénierie, sont déterminants pour la réalisation des objectifs liés au développement durable, qu'ils soient établis entre les disciplines de l'ingénierie au sein d'un établissement d'ingénierie ou entre les établissements nationaux et internationaux qui impliquent le gouvernement, l'industrie et les universités. Ces partenariats développent des solutions innovantes pour aborder les questions actuelles et futures et offrent des feuilles de route visant la mise en œuvre des technologies permettant le développement durable, afin de renforcer les capacités et les connaissances en termes de mécanismes de transfert des approches inclusives dans le développement durable.

Par exemple, la FMOI a établi des partenariats avec des organisations internationales d'ingénierie similaires, notamment l'International Engineering Alliance, la Fédération internationale des ingénieurs-conseils (FIDIC), le Réseau international des femmes ingénieurs et scientifiques (INWES) et la Federation of Engineering Education Societies (IFEES). Ces partenariats comprennent des organisations mondiales d'ingénierie et visent à élaborer des normes internationales pour l'enseignement de l'ingénierie en ce qui concerne les qualités des diplômés et les compétences professionnelles et à appuyer le renforcement des capacités d'ingénierie en Afrique, en Asie et en Amérique latine (FMOI, 2018b).

Ces organisations ont signé la Déclaration de Paris à l'UNESCO en mars 2018 pour affirmer leur engagement dans la réalisation des ODD des Nations Unies grâce à l'ingénierie (FMOI, 2018c). Par exemple, l'INWES et la FMOI ont collaboré lors de la Conférence des Nations Unies sur les changements climatiques (COP 24), tenue en décembre 2018 à Katowice, en Pologne, pour montrer les bonnes pratiques de l'ingénierie qui permettent d'atténuer les effets du changement climatique, en se focalisant sur les innovations faites par les femmes ingénieurs (INWES, 2018).

Des partenariats sont établis efficacement dans le monde entier pour réaliser les autres 16 ODD. Par exemple, le réseau Resilient Cities⁵² est un réseau collaboratif visant à partager les meilleures pratiques pour réaliser l'ODD 11 sur les villes durables.

WASH Agenda for Change⁵³ est un partenariat entre plusieurs organismes non gouvernementaux qui dirige les approches systémiques nationales et locales en vue de la prestation économique et durable des services d'eau, d'assainissement et d'hygiène (WASH) en Afrique et en Asie, qui sont essentiels pour réaliser l'ODD 6 sur l'eau propre et l'assainissement.

52 Site Web officiel du réseau Resilient Cities : <https://resilientcitiesnetwork.org>

53 Site Web officiel de WASH Agenda for Change : www.washagendaforchange.net

Références

- Amelang, S. 2018. Renewables cover about 100 % of German power use for first time ever. *Clean Energy Wire*, 5 janvier. www.cleanenergywire.org/news/renewables-cover-about-100-german-power-use-first-time-ever
- CEBR. 2016. *Engineering and Economic Growth*. Un rapport de CEBR pour l'Académie royale britannique d'ingénierie. Centre for Economics and Business Research. www.raeng.org.uk/publications/reports/engineering-and-economic-growth-a-global-view
- Chabba, R. et Raikundalia, S. 2018. Inexpensive impact: The case for frugal innovations. *Next billion*, 21 novembre. <https://nextbillion.net/inexpensive-impact-frugal-innovations>
- CTA. 2016. *Le pouvoir des cartes. Quand la 3D s'invite à la table des négociations*. Centre technique de coopération agricole et rurale ACP-UE. http://www.iapad.org/wp-content/uploads/2016/11/1944_PDF.pdf
- ECOSOC. 2017. *Autonomisation économique des femmes dans un monde du travail en pleine évolution*. Rapport du Secrétaire général, Commission de la condition de la femme, soixante-et-unième session. New York, Conseil économique et social. <https://undocs.org/fr/E/CN.6/2017/3>
- Engineers Australia. 2019. Code of Ethics and Guidelines on Professional Conduct. <https://www.engineersaustralia.org.au/sites/default/files/resource-files/2020-02/828145%20Code%20of%20Ethics%202020%20D.pdf>
- Engineers Canada. 2019. 30/30. <https://engineerscanada.ca/fr/diversite/les-femmes-en-genie/30-en-30>
- FMOI. 2010. *WFEO model code of ethics*. Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs. www.wfeo.org/wp-content/uploads/code_of_ethics/WFEO_MODEL_CODE_OF_ETHICS.pdf
- FMOI. 2015. *The Code of practice on principles of climate change adaptation for engineers*. Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs. www.wfeo.org/code-of-practice-on-principles-of-climate-change-adaptation-for-engineers
- FMOI. 2018a. Water, the future that we want, Madrid Declaration. Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs. www.wfeo.org/wp-content/uploads/declarations/Madrid_Declaration_ENG.pdf
- FMOI. 2018b. *WFEO Engineering 2030: A Plan to advance the UN Sustainable Development Goals through engineering*. Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs. www.wfeo.org/wp-content/uploads/un/WFEO-ENgg-Plan_final.pdf
- FMOI. 2018c. Déclaration de Paris de la FMOI et l'UNESCO. Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs. www.wfeo.org/wp-content/uploads/declarations/Paris-Declaration_WFEO-UNESCO_March-2018.pdf (en anglais).
- FMOI. 2020a. *The Value of Integrated Geospatial and Building Information Modelling (BIM) solutions to advance the United Nations Sustainable Development Goals (Agenda 2030) with specific focus on resilient infrastructure*. Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs, Conseil mondial de l'industrie géospatiale, Comité d'experts des Nations Unies sur la gestion de l'information géospatiale à l'échelle mondiale. <https://www.wfeo.org/wfeo-wgic-unggim-white-paper-geospatial-engg-sustainable-development>
- FMOI. 2020b. WFEO position to the build-back-better call for arms. Déclaration publique, 5 juin. Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs. http://www.wfeo.org/wp-content/uploads/un/WFEO_Statement-build_back_better_call_for_arms.pdf
- FMOI. 2020c. WFEO consultation on draft international standard ISO 37000. Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs, Organisation internationale de normalisation. <http://www.wfeo.org/wfeo-consultation-on-draft-international-standard-iso37000-governance-of-organisations>
- Gatti, G. 2018. How technology is helping Filipino farmers weather storms. <https://farmingfirst.org/2018/07/Gigi-Gatti-Grameen-Foundation>
- GEHealthcare. 2011. Market-relevant design: Making ECGs available across India. <http://newsroom.gehealthcare.com/ecgs-india-reverse-innovation>
- GEO. 2020. Eyes in the sky: how real-time data will revolutionise rice farming. Group on Earth Observations. *Université de Sydney*, 14 juillet. <https://www.sydney.edu.au/news-opinion/news/2020/07/14/paddy-watch-real-time-data-will-revolutionise-rice-farming-GEO-Google-Earth.html>
- IFEES. 2019. *Rising to the Top. Global woman engineering leaders share their journeys to professional success*. International Federation of Engineering Education Societies. <http://www.wfeo.org/wp-content/uploads/stc-women/Rising-to-the-Top.pdf>
- INWES. 2018. COP24 – Katowice Climate Change Conference décembre 2018. *INWES Newsletter*, 14 février. www.inwes.org/inwes-newsletter-28
- IRENA. 2018. *Énergies renouvelables et emploi. Examen annuel 2018*. Agence internationale pour les énergies renouvelables. https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/May/IRENA_RE_Jobs_Annual_Review_2018.pdf
- ISO. 2016. ISO 37001 – Système de management anticorruption. Organisation internationale de normalisation. www.iso.org/iso-37001-anti-bribery-management.html
- Kanga, M. 2014. *A Strategy for Inclusion, Well-being and Diversity in Engineering Workplaces*, http://www.wfeo.org/wp-content/uploads/un/sdgs/Inclusiveness_Wellbeing_Diversity_Strategy_MarleneKanga_Final_Nov_2014.pdf
- Keshvardoost, S., Bahaadinbeigy, M., et Fatehi, F. 2020. Role of Telehealth in the Management of COVID-19: Lessons Learned from Previous SARS, MERS, and Ebola Outbreaks. *Telemedicine and e-Health*, vol. 26, n° 7, pp. 850–852.

- LiveMint. 2019. Reliance Jio sold 5 crore smart feature phones in less than 2 years: Report. *LiveMint*, 20 février. www.livemint.com/technology/tech-news/reliance-jio-sold-5-crore-smart-feature-phones-in-less-than-2-years-report-1550635450416.html
- Lozkowski, D. 2018. Embracing a circular economy. *Chemical Engineering*, 1^{er} juin. www.chemengonline.com/embracing-circular-economy
- Maloney, W. F. et Caicedo, F. V. 2014. Engineers, Innovative Capacity and Development in the Americas. Policy Research Working Paper n° 6814. Washington, D.C., Banque mondiale. <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/17725/WPS6814.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- MAPAMA. 2014. *The water governance system in Spain*. Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation, Gouvernement espagnol. https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/sistema-espaniol-gestion-agua/cat-gob-agua-2014-en_tcm30-216099.pdf
- Marr, B. 2018. How is AI used in education – real world examples of today and a peek into the future. *Forbes*, 25 juillet. www.forbes.com/sites/bernardmarr/2018/07/25/how-is-ai-used-in-education-real-world-examples-of-today-and-a-peek-into-the-future/#7b58359e586e
- Massoumi, R. 2018. Why a managed services model could make intersections safer, smarter and more efficient. *SmartCitiesWorld*, 23 octobre. www.smartcitiesworld.net/opinions/why-a-managed-services-model-could-make-intersections-safer-smarter-and-more-efficient
- NSSC. 2017. The International Meridian Circle Program Workshop Held in Qingdao. Centre national des sciences spatiales, Académie chinoise des sciences. http://english.nssc.cas.cn/ns/NU/201705/t20170531_177611.html
- OCDE. 2018. *Climate resilient infrastructure*. OECD Environment Policy Paper n° 14. Organisation de coopération et de développement économiques. Paris, Éditions OCDE. www.oecd.org/environment/cc/policy-perspectives-climate-resilient-infrastructure.pdf
- OMPI. 2013. Le Chotukool : une innovation frugale au service de la fraîcheur. *OMPI Magazine*, décembre. Organisation mondiale de la propriété intellectuelle. https://www.wipo.int/wipo_magazine/fr/2013/06/article_0003.html
- ONU. 2019. Industry innovation and infrastructure: why it matters. Organisation des Nations Unies. www.un.org/sustainabledevelopment/wp-content/uploads/2018/09/Goal-9.pdf
- Pezon, C. 2020. In Coronavirus Response, AI is Becoming a Useful Tool in a Global Outbreak. *Machine Learning Times*, 29 janvier. <https://www.predictiveanalyticsworld.com/machinelearningtimes/in-coronavirus-response-ai-is-becoming-a-useful-tool-in-a-global-outbreak/10867>
- RAEng. 2018. *Greenhouse gas removal*. La Société royale et l'Académie royale d'ingénierie. www.raeng.org.uk/publications/reports/greenhouse-gas-removal
- Ramanath, R. V. 2017. Smart City: BMC shows the way by installing LED lights. *The Times of India*, 1^{er} août. <https://timesofindia.indiatimes.com/city/bhubaneswar/smart-city-bmc-shows-the-way-by-installing-led-lights/articleshow/59857487.cms>
- Ritchie, H. et Roser, M. 2019. Energy production and changing energy sources. Our World in Data. Disponible à l'adresse suivante : <https://ourworldindata.org/energy-production-and-changing-energy-sources>
- Roser, M. et Ortiz-Ospina, E. 2019. Tertiary education. Our World in Data. Disponible à l'adresse suivante : <https://ourworldindata.org/tertiary-education>
- Rozenberg, J. et Fay, M. 2019. *Beyond the Gap: How countries can afford the infrastructure they need while protecting the planet*. Washington, D.C., Banque mondiale. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/31291>
- Scallan, S. 2020. Using biomass to get to net zero. *Ecogeneration*, 15 juillet. <https://www.ecogeneration.com.au/using-biomass-to-get-to-net-zero/>
- SmartCitiesWorld. 2018. Singapore tops the smart city rankings. *SmartCitiesWorld*, 2 mai. www.smartcitiesworld.net/news/news/singapore-tops-the-smart-city-rankings-2875
- Strom, M. 2016. UNSW develops mini-factory that can turn old mobile phones into gold. *The Sydney Morning Herald*, 30 juillet. www.smh.com.au/technology/unsw-develops-minifactory-that-can-turn-old-mobile-phones-into-gold-20160729-gqgr83.html
- The Economist*. 2017. In much of sub-Saharan Africa, mobile phones are more common than access to electricity. The devices have helped poor countries leapfrog much more than landline telephony. *The Economist*, 8 novembre. <https://www.economist.com/graphic-detail/2017/11/08/in-much-of-sub-saharan-africa-mobile-phones-are-more-common-than-access-to-electricity>
- Ungerleider, N. 2013. This African inventor created a \$100 3 D printer from e-waste. *Fast Company*, 10 novembre. www.fastcompany.com/3019880/this-african-inventor-created-a-100-3-d-printer-from-e-waste
- Université de Washington. 2020. Newly developed nanotechnology biosensor being adapted for rapid COVID-19 testing. *SciTechDaily*, 25 avril. <https://scitechdaily.com/newly-developed-nanotechnology-biosensor-being-adapted-for-rapid-covid-19-testing>
- Zhang, K. 2020. 3D printing medical equipment for COVID-19. *Université de Melbourne*, 1^{er} mai. <https://pursuit.unimelb.edu.au/articles/3d-printing-medical-equipment-for-covid-19>
- Zhao, Y., Zhong S., Xia, Q., Sun, N., Cheng, S. et Xue, L. 2016. Metal organic frameworks for energy storage and conversion. *Energy Storage Materials*, vol. 2, pp. 35–62. www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405829715300568

2. ÉGALITÉ DES CHANCES POUR TOUS



si/travelalot/Shutterstock.com



Résumé. Les deux derniers rapports des Nations Unies sur *les Objectifs de développement durable* (ONU, 2019 ; 2020) mettent en lumière les progrès réalisés dans le monde pour atteindre les Objectifs de développement durable (ODD) et soulignent les secteurs qui nécessitent une attention urgente. Ces rapports révèlent que, malgré les progrès réalisés dans plusieurs secteurs au cours des quatre dernières années en rapport avec certains ODD, ceux-ci ont été lents, voire inversés¹. Les pays et les populations les plus vulnérables sont les plus exposés et continuent de souffrir, car la réponse mondiale n'a pas été suffisamment ambitieuse. Les ingénieurs jouent un rôle essentiel dans la réponse aux défis auxquels font face le monde et les populations. La pandémie de COVID-19 a créé de nouveaux défis ainsi que de nouvelles opportunités pour les professionnels de l'ingénierie. Les ingénieurs résolvent les problèmes et apportent des solutions aux problèmes de la société, car ils travaillent à bâtir un monde plus durable. Il est nécessaire de former un plus grand nombre d'ingénieurs afin de renforcer la main-d'œuvre. Aujourd'hui, le monde compte la plus grande génération de jeunes dans l'histoire, soit 1,8 milliard, dont 90 % vivent dans les pays en développement et constituent une grande proportion de la population, tandis que les femmes ingénieurs sont très peu représentées. Garantir l'égalité des chances pour tous et réduire les inégalités (ODD 10), promouvoir le travail décent et la croissance économique (ODD 8), et assurer l'égalité des sexes (ODD 5) permettront à un plus grand nombre de personnes de rejoindre la main-d'œuvre en ingénierie et de contribuer ainsi à la construction d'un monde plus juste, plus résilient et plus durable, un monde en accord parfait avec la nature.

1 Tel qu'indiqué dans le rapport d'étape 2020, p. 2 : « Jusqu'à la fin de l'année 2019, les progrès continuaient d'être réalisés dans certains domaines : la pauvreté mondiale continuait de reculer, bien qu'à un rythme ralenti, les taux de mortalité infantile et maternelle ont été réduits, plus de personnes ont eu accès à l'électricité et les pays ont défini des politiques nationales pour soutenir le développement durable et ont signé des accords internationaux de protection de l'environnement. Toutefois, dans d'autres domaines, les progrès ont été retardés ou inversés : le nombre de personnes qui souffrent de la faim a augmenté, les changements climatiques sont survenus plus rapidement que prévu et les inégalités ont continué de croître dans les pays et d'un pays à l'autre. »

Dawn Bonfield²

2.1 DIVERSITÉ ET INCLUSION DANS L'INGÉNIERIE



Robert Kneschke/Shutterstock.com

² Académie royale d'ingénierie, professeur itinérant d'ingénierie inclusive, Université Aston ; Directeur, Towards Vision.

Facteurs de changement

Au cours des dix dernières années, la diversité et l'inclusion dans l'ingénierie sont devenues un sujet dominant pour de nombreuses organisations d'ingénierie au monde. Cela est largement dû à plusieurs facteurs fondamentaux, notamment : i) la reconnaissance accrue du manque actuel et historique d'égalité des chances pour tous ; ii) une pénurie de compétences due à un monde de plus en plus technique, associée au vieillissement de la population (RAEng, 2019) ; iii) la reconnaissance du fait que l'innovation, le profit et l'ingénierie de haut niveau sont améliorés grâce à une équipe d'ingénieurs plus diverse (Hunt, Layton et Prince, 2015) ; et iv) l'attention accrue prêtée aux ODD et à leur signification pour l'ingénierie. Il est maintenant reconnu qu'adopter une approche plus multidisciplinaire et une mentalité plus inclusive permettra de relever les défis de manière plus stable et holistique, et fera en sorte que les progrès qui sont réalisés pour un objectif soient également pris en compte par rapport aux autres objectifs. Il est vital que la main-d'œuvre soit diverse et inclusive pour réussir à obtenir des solutions visant à atteindre ces objectifs multiples et divers, et celle-ci doit s'assurer que ses productions techniques et technologiques (produits, services et solutions) soient également inclusives et accessibles à tous. En effet, aucun des ODD ne peut être atteint si l'on ne trouve pas de solutions prenant en compte la diversité, sans la pleine participation des groupes sous-représentés et marginalisés, et sans leur participation réelle dans les prises de décisions politiques, économiques et publiques.

En outre, il est entendu que les effets des changements climatiques, tels que les sécheresses, les inondations et autres phénomènes météorologiques extrêmes, auront des répercussions disproportionnées sur les femmes et les personnes marginalisées dans le monde (OMS, 2011). En ce qui concerne de nombreux postes, le statut socioéconomique et de direction plus faible des femmes signifie que ces dernières n'auront que faiblement voix au chapitre lorsque des décisions majeures seront prises, et leur statut et leur expérience en tant que responsables de la famille, de l'alimentation, de la santé et du foyer ne leur assurent pas une représentation suffisante dans les solutions apportées. L'accès limité des femmes à l'éducation, à la propriété foncière et à l'autonomie dans certaines régions du monde signifie généralement que leurs besoins ne sont pas suffisamment pris en compte par l'ingénierie et les solutions technologiques. Il est plus qu'important d'encourager davantage la diversité dans l'ingénierie et de garantir l'obtention par ces groupes de personnes de postes impliquant des prises de décisions, pour faire en sorte que ces opinions soient représentées de manière égale, afin de finalement réaliser l'ensemble des ODD (Huyer, 2015 ; UNESCO, 2017).

Faire en sorte que les préjugés et la discrimination ne soient pas présents dans les futures solutions d'ingénierie est un objectif qui gagne en importance et en reconnaissance. Des changements remarquables surviennent actuellement, et créent un monde plus numérique motivé par les mégadonnées, l'apprentissage

automatique, les systèmes autonomes et l'intelligence artificielle. Si l'on ne fait pas attention, des préjugés et discriminations historiques seront intégrés aux nouveaux systèmes, ce qui aura pour conséquence imprévue le renforcement de la discrimination et des préjugés. Il existe déjà de nombreux cas où des prises de décisions algorithmiques, majoritairement non contrôlées, ont renforcé la discrimination à l'encontre de certains fragments de la population (Angwin *et al.*, 2016 ; Criado-Perez, 2019). En garantissant une main-d'œuvre diverse qui représente toutes les perspectives, ces préjugés sont plus susceptibles d'être reconnus et éliminés.

Opérer un changement culturel

En vue de parvenir de manière réussie à la diversité et à l'inclusion, la culture de l'ingénierie doit faire en sorte que toutes les personnes se sentent bien, intégrées, et soient en mesure d'apporter leur propre identité et leurs propres différences au domaine. Il convient de changer la culture au lieu de changer les personnes pour qu'elles correspondent à la culture existante. Si cela n'est pas fait, la diversité ne peut être réalisée et les avantages de solutions d'ingénierie plus impartiales et plus juste socialement seront moindres (RAEng, Académie royale d'ingénierie, 2017) et la rétention de talents diversifiés faiblira. Les ressources d'employés ou groupes d'affinité sont importants pour soutenir et autonomiser les groupes sous-représentés. De plus en plus de données montrent également que la culture non inclusive du domaine de la construction entraîne des problèmes de santé mentale et un risque accru de suicide parmi les travailleurs masculins (Burki, 2018).

Il est possible d'opérer un changement en modifiant les structures et les processus, notamment : i) en adoptant des mécanismes de recrutement et types de direction inclusifs (Moss-Racusin *et al.*, 2012) ; ii) en intégrant des éliminateurs de préjugés à des systèmes tels que les systèmes de salaires et de rémunération ; iii) et en établissant un mentorat et un mentorat inversé pour assurer la progression des groupes sous-représentés et l'élimination des inégalités (Yin-Che, 2013). Les cibles, les plans d'action, les paramètres et la responsabilité sont essentiels pour favoriser le changement culturel (RAEng, 2016).

Enfin, il est bon de remarquer que les compétences inhérentes nécessaires aux ingénieurs changent clairement au fur et à mesure que les technologies évoluent. Étant donné que l'intelligence artificielle, l'apprentissage automatique et l'usage de la robotique éloignent les personnes de compétences « pratiques » qui faisaient partie de l'ingénierie dans le passé, les compétences auparavant décrites comme « compétences non techniques » sont de plus en plus considérées comme les « compétences fondamentales » du futur. Les compétences comme la résilience, la souplesse, la capacité à acquérir de nouvelles connaissances, le travail en équipe et la communication deviendront tout aussi importantes, voire plus importantes, que les connaissances techniques détaillées qui étaient auparavant les plus estimées en ingénierie (Jackson et

Mellors-Bourne, 2018). Ce changement de compétences appellera à son tour un type différent d'ingénieurs, pour lequel la diversité sera le premier critère. Ce changement de perception de l'ingénierie entraînera un changement dans le personnel, au fur et à mesure que les personnes considéreront moins l'ingénierie comme un domaine difficile et principalement masculin, et plus comme une profession exigeant un vaste ensemble de compétences pour garantir le succès (Forum économique mondial, 2016).

Recommandations

Les recommandations suivantes visent à lever les obstacles à une ingénierie plus diverse et plus inclusive.

1. Les établissements devraient offrir des voies sans obstacle et un accès à l'éducation à l'ingénierie pour tous les étudiants et à chaque niveau de carrière afin de créer un environnement éducatif varié, où l'enseignement et l'apprentissage inclusifs – constamment axés sur le rôle de l'ingénierie dans la réalisation des ODD – façonneront un état d'esprit d'ouverture parmi les ingénieurs.
2. Les espaces de travail doivent amener un changement culturel en assignant des responsabilités claires pour réussir, ainsi qu'une stratégie constituée de cibles et de paramètres en vue de réaliser l'égalité, la diversité et l'inclusion.
3. Les établissements professionnels d'ingénierie et les organismes d'enregistrement doivent offrir une direction pour intégrer les principes de diversité et d'inclusion aux programmes de formation, à l'accréditation et à l'enregistrement professionnel, et développer des données comparatives, recueillies conformément à la charte inclusive de données (IDC) (GPSDD, 2018), visant à harmoniser le suivi et les comparaisons internationales.
4. Les gouvernements devraient offrir des financements accrus pour les priorités essentielles liées aux sujets suivants : i) intégration de paramètres et cibles d'égalité, de diversité et d'inclusion dans les contrats publics d'achat ; ii) facteurs structurels tels que le congé parental partagé, les politiques relatives à l'aménagement des modalités de travail et le signalement obligatoire des écarts de rémunération ; iii) et des audits de l'évaluation de l'impact de la diversité (DIA) pour toutes les décisions politiques.
5. Les organisations doivent identifier et aborder les questions de la discrimination, de l'intolérance et des inégalités systémiques et structurelles, qui empêchent certains secteurs de la société d'accéder à l'égalité des chances pour tous.
6. Le secteur de l'ingénierie dans son ensemble devrait reconnaître l'importance de la philosophie « ne laisser personne pour compte » des ODD et veiller à ce que les solutions technologiques soient en mesure de remédier aux inégalités actuelles.

Références

- Angwin, J., Larson, J., Mattu S. and Kirchner, L. 2016. Machine bias: There's software used across the country to predict future criminals. And it's biased against blacks. *ProPublica*, May. www.propublica.org/article/machine-bias-risk-assessments-in-criminal-sentencing
- Burki, T. 2018. Mental health in the construction industry. *The Lancet*, vol. 5, n° 4, p. 303. [www.thelancet.com/journals/lanpsy/article/PIIS2215-0366\(18\)30108-1/fulltext](http://www.thelancet.com/journals/lanpsy/article/PIIS2215-0366(18)30108-1/fulltext)
- Criado-Perez, C. 2019. *Invisible women. Exposing data bias in a world designed for men*. Londres, Chatto & Windus.
- Forum économique mondial. 2016. *The future of jobs*. Cologny, Suisse, Forum économique mondial. <http://reports.weforum.org/future-of-jobs-2016>
- GPSDD. 2018. *Inclusive Data Charter*. Global Partnership for Sustainable Development Data. www.data4sdgs.org/initiatives/inclusive-data-charter
- Hunt, V., Layton, D. et Prince, S. 2015. «Why diversity matters». McKinsey & Company. www.mckinsey.com/business-functions/organization/our-insights/why-diversity-matters
- Huyer, S. 2015. Is the gender gap narrowing in science and engineering? S. Huyer (dir. publ.), *UNESCO Science Report: Towards 2030*. Paris, Éditions UNESCO. <https://en.unesco.org/USR-contents>
- Jackson, P. et Mellors-Bourne, R. 2018. *Talent 2050: Engineering skills and education for the future*. Londres, National Centre for Universities and Business. www.ncub.co.uk/reports/talent-2050-engineering-skills-and-education-for-the-future
- Moss-Racusin, C.A., Dovidio, J.F., Brescoll, V.L., Graham, M.J. and Handelsman, J. 2012. Science faculty's subtle gender biases favor male students. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 109, n° 41, pp. 16474–16479.
- OMS. 2011. *Gender, Climate Change and Health*. Geneva: World Health Organization. www.who.int/globalchange/GenderClimateChangeHealthfinal.pdf
- ONU. 2019. *The Sustainable Development Goals Progress Report 2019*. United Nations Economic and Social Council. <https://unstats.un.org/sdgs/files/report/2019/secretary-general-sdg-report-2019--EN.pdf>
- ONU. 2020. *The Sustainable Development Goals Progress Report 2020*. United Nations Economic and Social Council. <https://unstats.un.org/sdgs/files/report/2020/secretary-general-sdg-report-2020--EN.pdf>
- RAEng. 2016. *Diversity and Inclusion. Professional framework for professional bodies*. Londres, Royal Academy of Engineering. www.raeng.org.uk/publications/other/diversity-progression-framework
- RAEng. 2017. *Creating cultures where all engineers thrive. A unique study of inclusion across UK engineering*. London: Royal Academy of Engineering. www.raeng.org.uk/publications/reports/creating-cultures-where-all-engineers-thrive
- RAEng. 2019. *Global Engineering Capability Review*. London: Royal Academy of Engineering. <https://www.raeng.org.uk/publications/reports/global-engineering-capability-review>
- Ro, H.K. and Loya, K. 2015. The effect of gender and race intersectionality on student learning outcomes in engineering. In: *Review of Higher Education*, Vol. 38, No. 3, pp. 359–396. <https://eric.ed.gov/?id=EJ1059327>
- UNESCO. 2017. *Cracking the code: Girls' and women's education in science technology, engineering and mathematics (STEM)*. Paris: UNESCO Publishing. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000253479>
- Yin-Che, C. 2013. Effect of reverse mentoring on traditional mentoring functions. *Leadership and Management in Engineering*, vol. 13, n° 3. <https://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/%28ASCE%29LM.1943-5630.0000227>

Dawn Bonfield³ et Renetta Tull⁴

2.2 LES FEMMES DANS L'INGÉNIERIE



©WFEO

Global Engineering London Congress 2018

- 3 Académie royale d'ingénierie, professeur itinérant d'ingénierie inclusive, Université Aston ; Directeur, Towards Vision.
- 4 Vice-Présidente pour la diversité, l'équité et l'inclusion, Université de Californie, Davis.

Résumé. Au niveau mondial, il existe peu de données cohérentes sur le nombre de femmes ayant la qualification d'ingénieur, travaillant dans le secteur de l'ingénierie ou jouissant du statut professionnel d'ingénieur agréé. Bien que des données nationales ventilées par sexe soient disponibles dans certains pays, celles-ci n'ont pas été recueillies dans le respect des normes internationales et sont souvent difficiles à comparer d'un pays à l'autre. Ce manque de données fiables limite la possibilité d'évaluer et de justifier clairement la nécessité d'agir, et de garantir ainsi une planification et une élaboration de politiques fondées sur des données probantes.

Introduction

À partir des données de l'Institut de statistique de l'UNESCO, l'indice de l'ingénierie 2019 indique par ordre de classement, le nombre de femmes diplômées de l'enseignement supérieur dans des programmes d'ingénierie, de fabrication et de construction à travers le monde (RAEng, 2019). Les pourcentages ventilés par sexes relatifs à l'enseignement de l'ingénierie au niveau supérieur sont indiqués par pays dans le *Rapport de l'UNESCO sur la science*, intitulé : *Vers 2030* (Huyer, 2015). Les données de 2015 montrent qu'en moyenne 27 % de la population mondiale, soit 8 % de la population mondiale féminine, est diplômée d'études supérieures en ingénierie, en fabrication et en construction, contre 22 % de la population mondiale masculine (UNESCO, 2017). Les données concernant les femmes qui embrassent une carrière d'ingénieur et qui ont l'autorisation d'exercer la profession ne sont pas disponibles au niveau mondial.

Le rapport *Engineering and economic growth: a global view* (RAEng, 2016) a révélé que les économies des pays en développement, dont le Myanmar, la Tunisie et le Honduras, sont les plus avancées dans le monde en matière de parité hommes-femmes dans l'ingénierie, puisqu'elles affichent la plus forte proportion de femmes diplômées en ingénierie, soit 65 %, 42 % et 41 %, respectivement. Dans la majorité des pays de l'OCDE, le nombre de femmes diplômées en ingénierie a augmenté au cours de la période 2008-2012, les augmentations les plus notables ayant été enregistrées dans les économies émergentes du Mexique, de la Hongrie et de la Turquie (plus de 150 %). Cependant, dans les pays développés, la hausse a souvent été moins marquée, le nombre de femmes diplômées en ingénierie ayant augmenté de 31 % et 24 % respectivement dans des pays comme le Royaume-Uni et les États-Unis, à partir d'un point de départ déjà faible.

Des organisations professionnelles d'ingénieurs ont fourni des statistiques comparables sur l'adhésion des femmes aux associations professionnelles, qui traduisent la représentation des femmes engagées dans la profession d'ingénieur. L'adhésion féminine à l'International Council on Systems Engineering (INCOSE) était de 17 % en 2018, de 12,2 % à l'Institute of Electrical and

Electronic Engineers (États-Unis) en 2019, et de 9 % à l'Institute of Engineering and Technology (Royaume-Uni) en 2019.

Éducation et obstacles aux progrès

Permettre aux femmes d'accéder à l'enseignement des sciences de l'ingénieur, les possibilités de développement professionnel, l'équité des salaires et les initiatives d'intégration vie professionnelle-vie personnelle est essentiel pour les engager, les retenir, développer leurs capacités de direction et les inciter à rester dans ce domaine et à contribuer à la profession (Montgomery, 2017 ; O'Meara et Campbell, 2011 ; Tull *et al.*, 2017). De nombreux obstacles empêchent les femmes et les jeunes filles d'accéder aux disciplines en rapport avec les STEM. Dans certains pays, les restrictions existent toujours et empêchent les filles d'étudier certaines matières à l'école, notamment les sciences (Agberagba, 2017). En outre, d'autres restrictions non politiques, telles que les stéréotypes liés au genre et les attentes des parents, continuent d'empêcher les filles d'accéder aux sciences et aux carrières d'ingénierie. Plusieurs interventions sont menées pour lever ces obstacles, mais leur impact ainsi que leur taux de réussite sont souvent indisponibles (OCDE, 2019). La Commission de la condition de la femme (CSW) des Nations Unies a mis en lumière la nécessité d'accroître la participation des filles et des femmes dans l'ingénierie à tous les niveaux, lors de ses soixante-et-unième (CSW61) et soixante-deuxième (CSW62) sessions à New York respectivement en 2017 et en 2018. La Commission a recommandé le renforcement des possibilités de carrière des femmes en exposant davantage les filles à des défis mondiaux tels que ceux représentés par les ODD.

Le Programme international pour le suivi des acquis des élèves (PISA) de l'OCDE a révélé que les capacités des filles et des garçons en matière de STEM sont quasiment identiques à l'âge de 15 ans, la différence se situant au niveau de la « force relative ». Ce qui signifie que les filles, bien qu'en général aussi douées que les garçons pour les STEM, sont relativement plus fortes en lecture, tandis que les garçons sont relativement plus forts en sciences et en mathématiques si l'on tient compte de l'ensemble des disciplines. Les apprenants semblent choisir leurs domaines d'études en fonction de leurs forces comparatives plutôt que de leurs forces absolues (Stoet et Geary, 2018).

Pour lever ces obstacles, il convient de doter les systèmes éducatifs et professionnels de mécanismes permettant de bien s'orienter vers une carrière future d'ingénieur, quel que soit le point de départ de l'individu (UNESCO, 2017). Dans l'enseignement supérieur, les apprenantes sont confrontées à des obstacles au moment de passer des études à l'emploi. Yates et Rincon (2017) déclarent que la rétention des femmes dans l'ingénierie et en tant qu'entrepreneurs peut être renforcée par l'acquisition d'une expérience professionnelle avant l'obtention du diplôme, ainsi qu'en développant les réseaux professionnels et les appuis externes pour contribuer à la transition vers la vie active. Les auteurs remarquent également que les femmes ingénieurs appartenant à des minorités demandaient un appui de la part de mentors féminins provenant de minorités, ainsi que de la part d'associations professionnelles, pour les relier aux réseaux professionnels.

Les académies de femmes se heurtent à des obstacles institutionnels résultant d'entraves majeures, tels que des taux de réussite limités et, dans bien des cas, un taux d'obtention de bourses nettement inférieur, outre des écueils en matière de publication des recherches (RSC, 2019). Ces facteurs limitent l'accès des femmes à la promotion, et donc aux postes de professeures dans les établissements d'enseignement de l'ingénierie. Il est essentiel d'examiner et de supprimer ces obstacles pour permettre aux femmes de progresser équitablement et de conquérir des postes de décision dans le milieu universitaire.

Les femmes occupant des postes de direction, qui ont des expériences uniques et comprennent, par expérience, ce que les autres femmes veulent devenir, ont la capacité d'accroître le nombre de femmes et de filles de tous âges dans l'ingénierie. Les femmes de tous milieux, notamment les femmes provenant de groupes et régions marginalisés ou sous-représentés, doivent être formées, employées et autonomisées afin de leur permettre d'atteindre leurs objectifs.

Progression, rétention et lutte contre la COVID-19

Les femmes qui réussissent à surmonter les obstacles à la poursuite d'une carrière d'ingénieur s'aperçoivent souvent que les environnements professionnels non inclusifs, les stéréotypes, les préjugés inconscients, les micro-inegalités et le harcèlement sexuel contribuent à les empêcher de s'épanouir dans le secteur de l'ingénierie et d'obtenir des postes de direction et de décision. Dans de nombreux cas, ces écueils poussent les femmes à quitter le secteur. Pour réaliser les acquis en matière de recrutement des femmes dans le secteur de l'ingénierie, il est essentiel de remédier à ces inégalités, de créer des cultures d'intégration et d'adopter des solutions systémiques pour assurer une progression équitable des femmes. Le signalement obligatoire des écarts de rémunération entre les sexes, l'introduction réussie dans plusieurs pays du congé parental partagé (notamment sous l'impulsion des pays scandinaves), la flexibilité des heures de travail, un bon système de garde d'enfants, et la fixation d'objectifs nationaux et de quotas pour assurer la représentation des femmes dans les conseils d'administration sont autant d'exemples d'interventions étatiques qui améliorent les perspectives offertes à l'ensemble des femmes dans le monde du travail.

L'impact de la pandémie de COVID-19 sur l'année 2020 risque sérieusement d'anéantir tous les progrès réalisés au cours des dernières décennies, puisque les femmes ont subi de plein fouet l'augmentation de la charge de travail due à la garde des enfants, à l'enseignement à domicile, aux responsabilités domestiques et à la prise en charge de parents âgés susceptibles de se retrouver isolés pendant le confinement. Il apparaît que les femmes sont moins nombreuses à soumettre des articles à des revues universitaires et à demander des subventions, et qu'elles sont plus facilement licenciées que leurs homologues masculins, car elles font partie du personnel ayant le moins d'ancienneté dans les entreprises. En cette période difficile, il convient de veiller à limiter au maximum tout désavantage lié au genre, et à recueillir les données ventilées par sexe afin de repérer les inégalités. Toute situation avantageant les femmes et retenant plus de femmes dans l'ingénierie doit

être encouragée, telle qu'une plus grande flexibilité de l'environnement de travail qui réduit au minimum les déplacements, qui permet que la charge de travail soit organisée autour de la maison et de la vie de famille, où les qualifications peuvent être acquises en ligne depuis la maison et où un style de leadership différent permet aux femmes de briller.

Conclusion

Il est essentiel d'attirer et de retenir une main-d'œuvre plus diversifiée en ingénierie pour s'assurer que les défis mondiaux représentés par les ODD sont relevés et que l'ingénierie associée à la technologie joue pleinement son rôle dans la lutte contre les changements climatiques et les inégalités dans le monde. Les multiples obstacles systémiques qui ont toujours empêché les groupes sous-représentés, en particulier les femmes, d'accéder au secteur de l'ingénierie doivent être levés en urgence. Pour y parvenir, il faut notamment : i) des méthodes coordonnées de collecte de données ; ii) des preuves et un partage de l'impact et de l'efficacité des interventions ; et iii) des changements législatifs et culturels, qui sont tous nécessaires. Pour permettre aux femmes de participer et de faciliter un tel changement, il est nécessaire qu'elles soient autonomisées et soutenues pour pouvoir accéder à des postes de direction.

Recommandations

1. *Données et preuves efficaces.* Collecter régulièrement des données mondiales fiables et accessibles, comparables au niveau international et ventilées par sexe, et les utiliser pour éclairer les processus politiques et décisionnels. Documenter l'efficacité et l'impact des interventions visant à encourager une main-d'œuvre plus diversifiée sur le plan du genre et partager les meilleures pratiques.
2. *Dans l'éducation.* Utiliser les ODD et les messages de justice sociale qui les accompagnent pour transmettre la valeur de l'ingénierie à la prochaine génération de jeunes femmes ingénieurs. Soutenir les femmes en phase de transition entre les études et l'emploi et faciliter la mobilité intersectorielle d'autres secteurs vers l'ingénierie pour celles qui sont à un stade avancé de leur carrière. Supprimer les désavantages systémiques qui entravent la progression des femmes dans les écoles d'ingénierie.
3. *Dans le lieu de travail.* Créer une culture d'entreprise inclusive dans laquelle les femmes ingénieurs s'épanouissent et accèdent équitablement aux postes de direction, et surveiller et éliminer tout désavantage lié au sexe résultant de la pandémie de COVID-19. En trouvant plutôt des moyens de tirer profit d'environnements de travail plus flexibles pour attirer et retenir les femmes.
4. *Gouvernement.* Renforcer les initiatives des pouvoirs publics qui soutiennent les femmes sur le marché du travail, telles que les rapports sur les écarts de rémunération entre les sexes, les objectifs relatifs à la représentation des femmes dans les conseils exécutifs, la flexibilité du travail, le congé parental partagé et la mise en place de bonnes structures de garde d'enfants.

Références

- Agberagba, V. 2017. *African Catalyst Project: Statistical data for women in science and engineering. A pilot project of Nigeria, Rwanda and Malawi*. [https://afbe.org.uk/docs/African%20catalyst%20Project%20%20-%20final%20%20%20submission%20\(1\).pdf](https://afbe.org.uk/docs/African%20catalyst%20Project%20%20-%20final%20%20%20submission%20(1).pdf)
- Huyer, S. 2015. Is the gender gap narrowing in science and engineering? *UNESCO Science Report Towards 2030*. Paris, Éditions UNESCO, pp. 85–103. <https://en.unesco.org/unescoscience-report>
- Montgomery, B.L. 2017. *Mapping a mentoring roadmap and developing a supportive network for strategic career advancement*. SAGE Open. <https://doi.org/10.1177/2158244017710288>
- OCDE. 2019. *Why don't more girls choose STEM careers?* Paris, Organisation de coopération et de développement économiques. www.oecd.org/gender/data/why-dont-more-girls-choose-stem-careers.htm
- O'Meara, K. et Campbell, C.M. 2011. Faculty sense of agency in decisions about work and family. *Review of Higher Education*, vol. 34, n° 3, pp. 447–476.
- RAEng. 2016. *Engineering and economic growth: a global view*. Londres, Académie royale d'ingénierie. www.raeng.org.uk/publications/reports/engineering-and-economic-growth-a-global-view
- RAEng. 2019. *Engineering Index 2019*. Londres, Académie royale d'ingénierie. <https://www.raeng.org.uk/RAE/EngineeringIndex/2019/index.html#slide-0>
- RSC. 2019. *Is publishing in the chemical sciences gender biased? Driving change in research culture*. Londres : Royal Society of Chemistry. www.rsc.org/globalassets/04-campaigning-outreach/campaigning/gender-bias/gender-bias-report-final.pdf
- Stoet G., et Geary D.C. 2018. The gender-equality paradox in science, technology, engineering, and mathematics education. *Psychol Sci.*, vol. 29, n° 4, pp. 581–593. Erratum dans : *Psychol Sci.*, janvier 2020, vol. 31, n° 1, pp. 110–111.
- Tull R.G., Tull, D.L., Hester, S. et Johnson, A.M. 2016. *Dark matters: Metaphorical black holes that affect ethnic underrepresentation in engineering*. Document présenté à la 2016 ASEE Annual Conference and Exposition, La Nouvelle-Orléans, LA, 26–29 juin. <https://peer.asee.org/dark-matters-metaphorical-black-holes-that-affect-ethnic-underrepresentation-in-engineering>
- UNESCO. 2017. *Cracking the code: Girls' and women's education in science technology, engineering and mathematics (STEM)*. Paris, Éditions UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000253479>
- Yates, N. et Rincon, R. 2017. *Minority Women in the Workplace: Early Career Challenges and Strategies for Overcoming Obstacles*. Washington, DC, American Society for Engineering Education. <https://peer.asee.org/28673>

Dhinesh Radhakrishnan⁵
et Jennifer J. DeBoer⁶

2.3

LES JEUNES INGÉNIEURS ET LEUR RÔLE



GaudiLab/Shutterstock.com

- 5 Assistant de recherche et d'enseignement, School of Engineering Education, Université Purdue, États-Unis.
6 Professeure agrégée, School of Engineering Education, Université Purdue, États-Unis.

Résumé. Le *World Youth Report* des Nations Unies déclare que les jeunes devraient devenir des architectes actifs, et non de simples bénéficiaires du Programme de développement durable à l'horizon 2030 (ONU, 2018a). Bien que les établissements prennent toutes les mesures possibles pour lutter contre le manque d'étudiants s'inscrivant à des diplômes STEM, une possibilité de transformation est trop souvent ignorée, car les jeunes⁷ peuvent devenir des participants actifs à leur éducation en ingénierie, plutôt que des consommateurs passifs des programmes standard. La présente sous-section aborde plusieurs exemples de modèles permettant d'impliquer les jeunes en tant que penseurs critiques, agents du changement et dirigeants, en vue de traduire dans les faits le Programme de développement durable à l'horizon 2030 (ONU, 2018b).

Compétitions visant à stimuler et étendre la réserve de futurs ingénieurs

De nombreuses compétitions mondiales et nationales d'ingénierie présentent les meilleures pratiques pour le Programme de développement durable à l'horizon 2030. Ces compétitions mondiales cherchent des moyens de diversifier et d'accroître le nombre d'étudiants choisissant les STEM en offrant une vision vaste et attrayante de la pratique de l'ingénierie. Les anciens étudiants qui exercent continuent de participer, tout au long de leur vie, aux sociétés disciplinaires, et servent de modèle aux jeunes ingénieurs et deviennent des agents de changement en mobilisant les autres. FIRST⁸ Robotics encourage la pensée critique, le travail en équipe, les connaissances STEM et la résolution des problèmes (UNESCOa, 2017). Les anciens étudiants sont 2,6 fois plus susceptibles de s'inscrire à un programme d'ingénierie au cours de la première année d'université, et les anciennes étudiantes sont 3,4 fois plus susceptibles de s'inscrire à des programmes d'ingénierie (Melchior *et al.*, 2018). La Foire internationale Intel de la science et de l'ingénierie (Intel ISEF)⁹

inspire des jeunes pour mener des recherches indépendantes sur des projets de sciences et d'ingénierie (ISEF, 2019).

La foire nationale des sciences et de l'ingénierie nommée FEBRACE¹⁰, au Brésil, de l'Université de São Paulo, encourage les jeunes à proposer des projets et se focalise sur les écoles sans infrastructures pour les STEM avancées (FEBRACE, n.d.). La South African Agency for Science and Technology Advancement organise la National Science Olympiad pour promouvoir la valeur et l'influence des sciences et de la technologie. L'Association chinoise pour la science et la technologie (CAST) dirige le programme intitulé « Science Talent Programme », qui encourage les jeunes talentueux et mène à des possibilités d'enseignement supérieur (CAST, 2007).

Les jeunes ingénieurs comme parties prenantes indépendantes ou au sein de sociétés professionnelles

Les jeunes ingénieurs faisant partie de programmes universitaires formels sont bien représentés dans les divisions étudiantes des sociétés professionnelles (par exemple, Young Engineers/Future Leaders (YE/FL)¹¹, division étudiante de l'organisation American Society for Engineering Education (ASEE SD)¹², où ils participent à des conversations directes avec les parties prenantes concernées, célébrant ainsi les progrès réalisés pour atteindre les ODD. Les initiatives indépendantes menées par des jeunes (par exemple, SPEED¹³, BEST¹⁴) contribuent au renforcement des compétences de direction civique parmi les jeunes, en les dotant des capacités nécessaires pour provoquer un changement.

Les divisions étudiantes de l'Institut d'ingénierie électrique et électronique (IEEE, 2018) établissent activement un réseau professionnel et développent les connaissances ainsi que les compétences en ingénierie. L'American Society for Engineering Education (ASEE), qui est la plus vaste société d'enseignement de l'ingénierie dans le monde, a créé une division étudiante après avoir reconnu la nécessité d'une voix et d'une direction étudiantes dans l'organisation. YE/FL est désormais un comité technique au sein de la Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs (FMOI) qui favorise les interactions aux fins de l'intégration des jeunes dans l'industrie, qui est une lacune majeure identifiée par la recherche (FMOI, 2018). Le programme YE/FL apporte le

7 L'UNESCO définit la jeunesse suivant l'âge. Aux fins de la cohérence entre les régions, le terme « jeune » désigne les personnes âgées de 15 à 24 ans, sans préjudice des autres définitions données par les États membres (UNESCO, 2017b). Cette section comprend tous les individus de ces âges, y compris les étudiants du niveau secondaire, les étudiants à l'université, les personnes se trouvant dans les domaines de la production et la construction, les étudiants en doctorat ou dans l'enseignement technique ou professionnel, les nouvelles recrues de l'industrie, ainsi que les jeunes en abandon scolaire.

8 For Inspiration and Recognition of Science and Technology est une organisation internationale de jeunesse qui met les étudiants en compétition et dont le but est de construire des robots de taille industrielle.

9 Intel ISEF est la plus grande compétition scientifique du monde pour le secondaire.

10 Feira Brasileira de Ciências e Engenharia.

11 Young Engineers/Future Leaders de la Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs.

12 Division étudiante de l'American Society for Engineering Education (ASEE SD).

13 Student Platform for Engineering Education Development (www.worldspeed.org).

14 Board of European Students of Technology (www.best.eu.org/).

point de vue des jeunes sur les pratiques de l'industrie, les ODD et les liens entre les pays développés et en développement.

L'organisation mondiale étudiante à but non lucratif, nommée SPEED (Student Platform for Engineering Education), constituée d'un réseau interdisciplinaire d'étudiants, qui souhaite amener un changement dans l'enseignement de l'ingénierie en laissant davantage les étudiants s'exprimer. Depuis son lancement en 2006, SPEED a eu la justice sociale à cœur en dotant les étudiants des capacités de prendre l'initiative d'améliorer l'enseignement de l'ingénierie et de s'axer sur des plans d'action concrets (Shea et Baillie, 2013). Par exemple, le Global Student Forum 2017 de SPEED a encouragé les discussions autour de l'eau potable, de l'énergie et des questions connexes (SPEED, 2017). Le Board of European Students of Technology (BEST) est une association non gouvernementale d'étudiants européens en sciences et en ingénierie qui organise des événements pour promouvoir une mentalité internationale. Le comité éducatif de BEST rassemble des contributions d'étudiants par l'intermédiaire d'« événements sur l'éducation » et d'études. Les résultats sont distribués et de nouveaux programmes sont élaborés, comme le stage virtuel lancé en 2014 (Christofil *et al.*, 2015).

Développement international et programmes d'ingénierie humanitaire

Des chercheurs dans le domaine de l'éducation ont montré que « l'apprentissage [authentique] par la pratique » en vue du développement motive les étudiants à persévérer malgré la désorientation ou la frustration (Lombardi et Oblinger, 2007). Les stages à long terme sur le terrain d'Ingénieurs sans frontières - Australie (EWB-A) en sont un exemple réussi. En déployant des ingénieurs volontaires dans des contextes réels, EWB-A relève des défis complexes d'ingénierie tout en renforçant les capacités locales. Le D-Lab au Massachusetts Institute of Technology (MIT) a formé plus de 2 000 étudiants en développement international, tout en abordant des questions d'équité en rassemblant les femmes, les minorités et les étudiants LGBTQ¹⁵ dans des équipes transdisciplinaires (MIT D-Lab, 2018 ; Murcott, 2015).

L'ingénierie par et pour les réfugiés

Au vu de leurs connaissances uniques, les jeunes réfugiés devraient bénéficier de la possibilité d'acquérir des compétences en ingénierie. Un nouveau modèle de renforcement des capacités d'ingénierie parmi les jeunes réfugiés a été élaboré par le DeBoer Lab (Université Purdue, 2018) en Indiana, aux États-Unis, en collaboration avec les partenaires locaux dans plusieurs endroits. Le système offre des crédits universitaires

aux réfugiés dans les camps d'Azrap (Jordanie) et de Kakuma (Kenya) et utilise la conception d'ingénierie pour guider les étudiants dans la résolution de problèmes axés sur la communauté. En utilisant un modèle actif, intégré, collaboratif et démocratique (de Freitas *et al.*, 2018), les étudiants règlent des problèmes locaux et deviennent des agents de changement.

« L'ingénierie m'a appris à répondre à différents besoins relatifs à la diversité et à travailler en équipe. Je peux identifier les besoins, les problèmes et trouver des solutions en utilisant un processus de conception d'ingénierie à plusieurs étapes. Je peux aussi transmettre mes solutions efficacement et obtenir des retours d'information. L'échec, pour moi, ce n'est pas une fin, mais une étape. »

– Kakuma, jeune réfugié diplômé en ingénierie

Programmes de création d'espaces adaptés au contexte et axés sur les communautés pour les jeunes non scolarisés

En 2019, 258 millions d'enfants et de jeunes n'étaient pas scolarisés (UNESCO-UIS, 2019), ce qui représente un potentiel non exploité. Cependant, les apprentissages informel et formel peuvent aussi contribuer à transformer ces individus en ingénieurs. Depuis 2015, le DeBoer Lab travaille avec d'anciens « jeunes de la rue » au Tumaini Innovation Center, au Kenya, pour appliquer le modèle actif, intégré, collaboratif et démocratique auprès d'étudiants en ingénierie avant leur entrée à l'université. Les étudiants acquièrent des compétences fondatrices en ingénierie et des principes de « fabrication » pour résoudre des problèmes locaux, par exemple concevoir un système d'énergie solaire photovoltaïque pour apporter de l'électricité aux salles de classe puis agir en qualité de consultant de maintenance de ce système pour la communauté. Vigyan Ashram, en Inde, est un autre exemple réussi de programme de formation formelle qui appuie les jeunes non scolarisés à travers des compétences pratiques de résolution des problèmes et sert de modèle unique de renforcement des capacités des jeunes en Inde (Kulkarni, Ballal et Gawade, 2012).

Conclusion

Les voies formelles et non formelles de l'ingénierie offrent la possibilité de choisir des jeunes de manière plus diverse et créer un cadre plus inclusif d'ingénieurs représentant mieux la société. Les jeunes, qui deviendront des dirigeants et créeront eux-mêmes des emplois, pourront favoriser les progrès nationaux, régionaux et mondiaux en vue de la réalisation des ODD. L'élite actuelle et le système strict d'enseignement formel de l'ingénierie actuels doivent être éliminés et remplacés par un

15 Lesbiennes, gays, bisexuels, transgenres, queer/personnes en questionnement.

L'ingénierie au service du développement durable

ensemble plus divers d'expériences, et par une compréhension des questions sociales et environnementales. Les jeunes qui sont motivés par la justice sociale et les considérations environnementales doivent participer pleinement à cette transformation pour changer la pratique de l'ingénierie, et, à leur tour, faire de l'ingénierie un outil de développement inclusif.

2

Recommandations

- 1. Dirigeants.** Impliquer directement les jeunes ingénieurs dans l'élaboration des programmes, les espaces d'apprentissage et l'emploi. Financer des programmes qui engagent les jeunes en situation de vulnérabilité et inciter les organisations à s'impliquer. Élaborer des normes et des règles de responsabilité en matière d'ingénierie aux niveaux primaire et secondaire. Encourager les jeunes à résoudre les problèmes en les engageant dans leurs communautés.
- 2. Dirigeants d'industrie.** S'engager avec les organisations d'étudiants pour transmettre directement les pratiques professionnelles actuelles, combler les lacunes abordées dans les recherches (Stevens, Johri et O'Connor, 2014). Collaborer avec des programmes à destination des jeunes ingénieurs en situation de vulnérabilité. Appliquer des solutions technologiques et programmatiques pour renforcer l'accès aux études et aux initiatives de formation.
- 3. Éducateurs.** Travailler avec les collaborateurs pour introduire plus tôt les jeunes à l'ingénierie dans le programme d'études (niveau secondaire ou avant). Concevoir des programmes en utilisant l'apprentissage authentique dans les espaces formels et informels, notamment plusieurs moyens pour que les étudiants aient une expérience réaliste et pratique du travail en tant qu'ingénieurs.

Références

- CAST. 2007. Science education programs. China Association for Science and Technology. <http://english.cast.org.cn>
- Christofil, N., Cortesao, M.F., Brovkaite, E. et Marini, A. 2015. European education trends and BEST as an Open Social Learning Organisation. *Proceedings in EICC: 4th Electronic International Interdisciplinary Conference*, pp. 15–18.
- de Freitas, C.C.S., Beyer, Z.J., Al Yagoub, H.A. et DeBoer, J. 2018. Fostering engineering thinking in a democratic learning space: A class-room application pilot study in the Azraq Refugee Camp, Jordan. Document présenté à la 2018 ASEE Annual Conference and Exposition. <https://www.asee.org/public/conferences/106/papers/23720/view>
- FEBRACE. n.d. Quem faz a FEBRACE? <https://febrace.org.br/quem-faz-a-febrace/#.W7vDp2hKiUk> (en portugais).
- FMOI. 2018. Committee on Young Engineers/Future Leaders (YE/FL) – Overview. World Federation of Engineering Organizations. www.wfeo.org/committee-young-engineers-future-leaders
- IEEE. 2018. IEEE student branches by region. Institute of Electrical and Electronics Engineers. www.ieee.org/membership/students/branches/student-branches-by-region.html#
- ISEF. 2019. Think beyond. International Science and Engineering Fair. <https://sspcdn.blob.core.windows.net/files/Documents/SEP/ISEF/2019/Attendees/Programs/Book.pdf>
- Kulkarni, Y., Ballal, S. et Gawade, J. 2012. Technology transfer to rural population through secondary schools: The Vigyan Ashram Experience. *2012 IEEE Global Humanitarian Technology Conference*, pp. 411–416.
- Lombardi, B.M.M. et Oblinger, D.G. 2007. Authentic learning for the 21st century: An overview. *Educause Learning Initiative. Advancing Learning through IT Innovation*. <https://library.educause.edu/resources/2007/1/authentic-learning-for-the-21st-century-an-overview>
- Melchior, A., Burack, C., Hoover, M. et H. Zora, H. 2018. FIRST longitudinal study: Findings at 48-month follow-up (Year 5 report), avril.
- MIT D-Lab. 2018. MIT D-Lab designing for a more equitable world. <https://d-lab.mit.edu>
- Murcott, S. 2015. D-Lab and MIT Ideas Global Challenge: Lessons in mentoring, transdisciplinarity and real world engineering for sustainable development. *7th International Conference on Engineering Education for Sustainable Development*, pp. 1–8.
- ONU. 2018a. *World youth report: Youth and the 2030 Agenda for Sustainable Development*. New York: , ONU.
- ONU. 2018b. Youth and the SDGs. www.un.org/sustainabledevelopment/youth
- Shea, J.O. et Baillie, C. 2013. *Engineering education for social and environmental justice*. Australian Government Office for Learning and Teaching. https://ltr.edu.au/resources/CG10-1519_Baillie_Report_2013.pdf
- SPEED. 2017. Global student forum. Student Platform for Engineering Education Development. <https://worldspeed.org>
- Stevens, R., Johri, A. et O'Connor, K. 2014. Professional engineering work. A. Johri and B.M.E. Olds (dir. publ.), *Cambridge Handbook of Engineering Education Research*. Cambridge, Cambridge University Press, pp. 119–138.
- UNESCO. 2017a. 15 Clues to support the Education 2030 Agenda. In Progress Reflection No. 14 on Current and Critical Issues in the Curriculum, Learning and Assessment. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000259069>
- UNESCO. 2017b. What do we mean by 'youth'? <https://en.unesco.org/youth>
- UNESCO-UIS. 2019. 258 million children and youth are out of school. Fact Sheet n°. 56, septembre. UNESCO-UNESCO Institute of Statistics.
- UNHCR. 2020. UNHCR figures at a glance. UN Refugee Agency. www.unhcr.org/figures-at-a-glance.html
- Université Purdue. 2018. Multidisciplinary engineering – humanitarian engineering. <https://engineering.purdue.edu/ENE/Academics/Undergrad/MDE/PlansofStudy/humanitarian-engineering>
- University of Colorado Boulder. 2019. Mortenson Center Global Engineering. www.colorado.edu/center/mortenson/about-us

3. INNOVATIONS EN INGÉNIERIE ET OBJECTIFS DE DÉVELOPPEMENT DURABLE



loveleyday12/Shutterstock.com



Résumé. Chaque Objectif de développement durable (ODD) exige des solutions ancrées dans la science, la technologie et l'ingénierie. Ce rapport n'étant pas en mesure de couvrir le vaste champ de l'ingénierie, ce chapitre fournit des instantanés des innovations en ingénierie qui relèvent les principaux défis : la pandémie de COVID-19, l'eau propre et l'assainissement, ainsi que les problèmes liés à l'ingénierie hydraulique, l'urgence climatique et les catastrophes naturelles, l'énergie propre et l'ingénierie minière, l'exploitation des nouvelles technologies telles que les mégadonnées, l'intelligence artificielle et le concept de villes intelligentes pour le développement durable. Tous ces défis ayant montré concrètement comment l'ingénierie peut aider à promouvoir les ODD et à améliorer la qualité de la vie humaine. Ces solutions d'ingénierie ne se limitent pas uniquement à la technologie, elles sont également accompagnées de codes éthiques, de normes et standards afin de garantir que les pratiques de l'ingénierie sont menées de manière responsable. Il est aussi à noter que l'UNESCO, à travers ses programmes d'ingénierie et ses centres de catégorie I et II, joue un rôle particulièrement important dans la promotion des innovations en ingénierie en faveur des ODD. L'UNESCO a continuellement travaillé avec des sociétés d'ingénierie et a soutenu des solutions d'ingénierie pour la mise en œuvre des ODD en mettant l'accent sur le renforcement des capacités en ingénierie dans les pays en développement, notamment dans les domaines suivants : la gestion des catastrophes et des risques climatiques, le développement de l'ingénierie de l'eau, et l'application responsable de l'intelligence artificielle et des mégadonnées, entre autres. Bien que des progrès significatifs aient été réalisés en matière d'innovations en ingénierie, des disparités subsistent entre les capacités en ingénierie actuelles et celles réellement requises pour atteindre les ODD, afin de ne

laisser personne pour compte. Un ensemble de recommandations est proposé pour remplir les écarts, lesquelles exigent des efforts combinés du gouvernement, des établissements universitaires et d'enseignement ainsi que des industries et des sociétés d'ingénierie.

Shankar Krishnan¹ et Ratko Magjarević²

3.1 INNOVATIONS EN INGÉNIERIE POUR LUTTER CONTRE LA COVID-19 ET AMÉLIORER LA SANTÉ HUMAINE



Alexander_LUX/Shutterstock.com

- 1 Président, International Federation for Medical and Biological Engineering, IFMBE.
- 2 President-elect, International Federation for Medical and Biological Engineering, IFMBE; University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing, Zagreb, Croatia.

Introduction

Le 30 janvier 2020, l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) a déclaré une urgence de santé publique de portée internationale (USPPI) à la suite d'une épidémie du nouveau coronavirus 2 du syndrome respiratoire aigu sévère (SRAS-CoV-2), qui a été déclarée pandémie le 11 mars 2020 (OMS, 2020a). En raison de la pandémie, la charge de travail du personnel de santé dans le monde entier a augmenté de manière exponentielle, dans la mesure où il est confronté à des défis sans précédent pour faire face au nombre croissant de personnes infectées par le coronavirus (COVID-19) et où il a de toute urgence besoin d'aide dans de nombreux domaines. Des ingénieurs biomédicaux issus de l'industrie, des universités et des centres de recherche ont travaillé en collaboration avec des experts de plusieurs disciplines afin de développer et de fournir des solutions innovantes et rapides pour des opérations appropriées de test, de diagnostic, de traitement, d'isolement et a recherche des contacts afin d'atténuer la propagation de la COVID-19.

Objectif

L'objectif du présent rapport est de passer en revue les approches en matière d'ingénierie pour lutter contre la COVID-19 et améliorer les soins de santé. Certaines technologies clés ont été mises en œuvre pour fournir des soins efficaces aux patients atteints de COVID-19 et pour lutter contre la pandémie, notamment des dispositifs médicaux de diagnostic et de traitement, les technologies de l'information et de la communication (TIC), l'Internet des objets médicaux, l'intelligence artificielle, la robotique et la fabrication d'additifs. Ces initiatives ont accéléré la capacité à détecter rapidement et précisément les infections virales et ont contribué à la fabrication d'un certain nombre de dispositifs complexes de maintien des fonctions vitales tels que des respirateurs, des dispositifs d'imagerie et de surveillance, des dispositifs d'isolation efficace, de recherche de contacts et d'analyse de données importantes, nécessaires pour offrir une assistance rapide en matière de soins de santé. L'intelligence artificielle ainsi que la télémédecine et la robotique, sont utilisées pour prédire le nombre potentiel de cas positifs et de décès probables. Le nombre croissant de patients a permis d'accélérer la production de dispositifs diagnostiques et thérapeutiques et d'équipements de protection individuelle (EPI), ce qui a conduit à de nouveaux procédés de production. Même si de nombreux ingénieurs biomédicaux se concentrent actuellement sur l'atténuation de la pandémie, l'objectif général reste d'améliorer les soins de santé et de réaliser les ODD en mettant en œuvre des avancées technologiques pour aider au diagnostic, au traitement et à la réadaptation rapides des patients, tout en obtenant une plus grande précision à moindre coût pour le bien-être de tous.

Dispositifs de diagnostic et de traitement

L'OMS a établi une liste de dispositifs médicaux prioritaires requis pour la gestion clinique de la COVID-19 et a également fourni des

directives provisoires ainsi que des spécifications techniques et opérationnelles pour leur utilisation (OMS, 2020b). Cette liste comprend l'oxygénothérapie, les oxymètres de pouls, les moniteurs patients, les thermomètres, les pompes à perfusion et à aspiration, les scanners à rayons X, à ultrasons et TDM, les EPI (OMS, 2020c), ainsi que les normes, accessoires et consommables connexes.

Différentes méthodes de dépistage de la COVID-19 ont été soigneusement analysées dans l'espoir de trouver la technique la plus efficace pour détecter le virus. Il existe désormais quatre tests de diagnostic disponibles, à savoir les tests rapides au point de service, les tests combinés, les tests de salive et les tests de prélèvement à domicile qui offrent aux individus des options alternatives en fonction des différents scénarios et circonstances (FDA)³. Le test de référence en matière de détection de l'infection par le CoV-2 du SRAS repose principalement sur l'amplification en chaîne par polymérase par transcription inverse (RT-PCR), qui présente une sensibilité et une spécificité élevées permettant la détection de l'acide ribonucléique (ARN) viral. Toutefois, en raison de sa complexité, il demande beaucoup de temps de traitement. Des tests rapides, en laboratoire et au point de service, de détection d'antigènes ont donc été mis au point ; ceux-ci offrent des résultats en trente minutes et à faible coût.

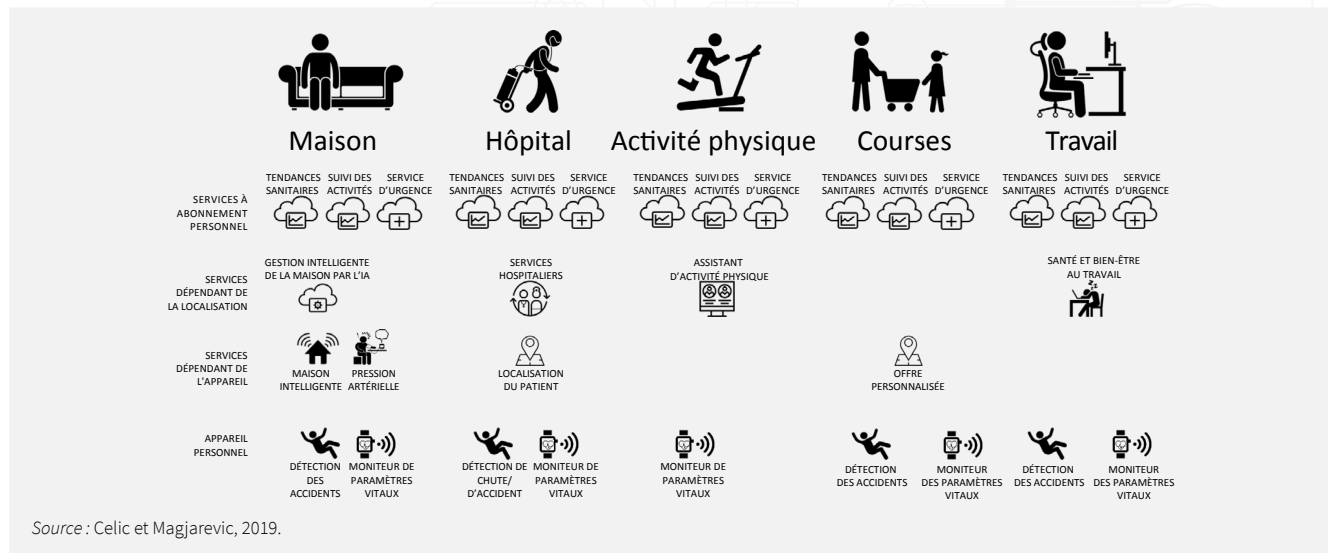
Les patients en état critique souffrant d'insuffisance respiratoire ont besoin d'une assistance respiratoire sous la forme d'un respirateur mécanique (Andellini *et al.*, 2020) et du réglage de respirateur le plus approprié pour une ventilation personnalisée (USPHSCC, 2020). L'utilisation de l'impression 3D pour répondre à des requêtes a permis de trouver des solutions : des pièces de rechange aux dispositifs médicaux et aux EPI (Choong *et al.*, 2020). Les patients admis à l'hôpital avec de graves problèmes respiratoires ont besoin de respirateurs. Toutefois, compte tenu du faible nombre de respirateurs disponibles, une nouvelle collaboration entre Ford, General Electric (GE) et Airon a été amorcée (Ford, 2020).

Technologies de l'information et de la communication

La pandémie de COVID-19 a donné un nouvel élan à la technologie numérique dans la société. Dans de nombreux pays, le système de santé a adopté des outils technologiques numériques avancés en réponse à la pandémie (Golinelli *et al.*, 2020). La télémédecine est reconnue comme un service TIC efficace et pratique pour collecter, stocker, récupérer et échanger des informations médicales sans contact direct entre le fournisseur de service et le client (Bokolo *et al.*, 2020). L'utilisation de la télémédecine pour les traitements virtuels et les téléconsultations est en nette hausse depuis le début de l'année 2020 (Brodwin et Ross, 2020 ; Ohannessian *et al.*, 2020).

3 Pour en savoir plus sur les fondamentaux des tests de la maladie à coronavirus 2019 effectués par la Food & Drug Administration américaine, consultez le site <https://www.fda.gov/consumers/consumer-updates/coronavirus-disease-2019-testing-basics>

Figure 1. Services dans les activités quotidiennes de l'utilisateur. Les applications de l'Internet des objets médicaux englobent l'acquisition d'informations relatives à la physiologie, à la santé et au comportement, et d'autres informations permettant de déterminer l'état de santé (Celic, 2019)



Peu après l'apparition du virus à Wuhan, en Chine, en décembre 2019, il a été conseillé aux patients de chercher une aide médicale en ligne plutôt qu'en personne afin d'éviter tout contact direct (Webster, 2020). Une étude récente sur l'utilisation des smartphones et des technologies sans fil pour la santé en a confirmé la viabilité dans la surveillance des patients atteints de COVID-19 et la prédiction de l'aggravation des symptômes en vue d'une intervention précoce (Adans-Dester *et al.*, 2020). Des applications interactives intégrées dans des smartphones ou des appareils similaires, avec des écrans interactifs de haute qualité, des caméras et des équipements audio haute résolution, ont facilité le contact et la communication bidirectionnelle avec les cliniciens, ainsi que l'acquisition d'informations et de conseils de santé à partir de divers services en ligne. Un système de connectivité en ligne généralisée jointe à l'adoption rapide de la télémédecine pourrait permettre une meilleure coordination avec la fourniture de soins de santé personnalisés à l'avenir (Kannampallil et Ma, 2020). Toutefois, bien que les processus de dépistage de la COVID-19 aient été disponibles sur des plateformes en ligne peu après l'apparition du coronavirus, de nombreuses personnes n'ont pas pu accéder au système en ligne en raison de la fracture numérique (Ramsetty et Adams, 2020). Afin de comprendre les raisons de la propagation des pandémies, il est possible de faire dériver des données agrégées de positionnement mobile le suivi des positions des personnes rendues anonymes grâce à des indicateurs de mobilité (Sonkin *et al.*, 2020). Les services Internet apportent également un soutien indirect à la lutte contre les coronavirus en sensibilisant le public aux pandémies et en clarifiant les décisions et les politiques gouvernementales importantes concernant le public.

Internet des objets médicaux

L'infrastructure connectée regroupant les dispositifs médicaux, les systèmes et les services de santé est connue sous le nom d'Internet des objets médicaux. Elle connecte les applications et les

dispositifs médicaux à un réseau où les « objets » communiquent entre eux de manière indépendante. Cette connectivité permet de collecter à distance des informations relatives à la physiologie, à la santé (Aydemir, 2020) et au comportement, et d'autres informations permettant de déterminer l'état de santé, le diagnostic ou le traitement des personnes vivant dans des endroits reculés (Venkatesan *et al.*, 2020). L'avantage de l'Internet des objets médicaux est l'automatisation de la communication, qui s'effectue de machine à machine et en temps réel. Les informations provenant des dispositifs portables, des appareils électroménagers et des véhicules sont intégrées dans des ensembles de données multiparamétriques, c'est-à-dire des données volumineuses. Sur la base des informations acquises, les symptômes les plus courants peuvent être détectés dès leur apparition, ce qui permet un diagnostic rapide des cas aux premiers stades de la maladie et l'auto-isolement du patient pour éviter la propagation de l'infection. Toutefois, l'interconnectivité des appareils par le biais des réseaux cellulaires et domestiques et du Wi-Fi accentue la vulnérabilité potentielle de la vie privée par le piratage ou l'accès aux données médicales personnelles.

Applications de l'intelligence artificielle

Les applications de l'intelligence artificielle (IA) en biomédecine peuvent permettre d'accroître la précision et la sécurité dans toute une série de domaines biomédicaux, tels que le dépistage de santé, le diagnostic et le traitement des maladies, la formation à la réadaptation et l'évaluation des personnes sous réadaptation, les services médicaux et la gestion de ces services, le criblage et l'évaluation des médicaments, ainsi que le séquençage et la caractérisation des gènes. Ces applications reposent sur des données médicales, notamment des images, des atlas, des dossiers médicaux et d'autres sources d'informations médicales, qui peuvent être rapidement traitées par l'IA. Les processus médicaux,

L'ingénierie au service du développement durable

notamment la gestion intelligente de la pathogenèse des maladies, le diagnostic précis, le traitement sûr et l'évaluation scientifique, peuvent améliorer considérablement l'efficacité opérationnelle des médecins. Ils peuvent ainsi pallier la pénurie de médecins, améliorer la précision des diagnostics et des traitements et optimiser l'allocation des ressources médicales de haute qualité, la surveillance et l'alerte de santé en temps réel, le développement rapide de l'Internet des objets médicaux, des dispositifs portables et des dispositifs médicaux, autant d'éléments qui peuvent bénéficier de l'utilisation de l'intelligence artificielle. Dans l'ensemble, les applications de l'IA peuvent permettre l'innovation en matière de technologie médicale et faire évoluer les soins de santé vers une approche d'analyse quantitative (CAE, 2019).

Grâce à un déploiement prudent d'applications de l'intelligence artificielle, il est possible d'améliorer l'efficacité et la qualité des soins en s'appuyant sur une combinaison de modèles de prédiction, d'analyse de décision et d'initiatives d'optimisation visant à soutenir les décisions et les programmes dans le domaine des soins de santé. Les méthodes d'intelligence artificielle sont prometteuses en ce qui concerne les nombreux rôles en matière de soins de santé, notamment la prise en charge des maladies aiguës et à long terme, la détection des risques cachés de résultats négatifs potentiels et l'alerte à ces risques, l'orientation sélective de l'attention, des soins médicaux et des programmes d'intervention, réduisant ainsi les erreurs dans les hôpitaux et promouvant la santé et les soins préventifs⁴.

Encadré 1. Applications de l'intelligence artificielle dans la lutte contre la COVID-19

Depuis le début de la pandémie, l'IA contribue à la lutte contre la COVID-19 en termes d'alertes et d'avertissements anticipés, de suivi et de prévision, de tableaux de bord de données, de diagnostic et de pronostic, de traitements et de remèdes, de contrôle social et de développement de vaccins.

L'un des défis urgents à l'heure de la COVID-19 était de réduire le temps de diagnostic et d'aider les médecins à prendre des décisions rapides et correctes en utilisant les outils techniques appropriés. Grâce aux nombreuses images de tomodensitométrie (TDM) soigneusement annotées, les chercheurs et les ingénieurs ont mis au point un système de tomodensitométrie assisté par IA qui permet de dépister les cas douteux de COVID-19 en quelques minutes, ce qui réduit considérablement le temps de diagnostic tout en augmentant la précision du diagnostic. Le système d'IA a été utilisé dans des hôpitaux de différents pays, comme la Chine, le Japon et l'Italie, permettant un contrôle complémentaire utile pour traiter les potentiels cas de tests RT-PCR faussement négatifs.

Il convient de mentionner que la République de Corée a réussi à contenir la COVID-19 sans interrompre son économie grâce à l'IA à travers les étapes suivantes (UIT, 2020) :

- Mise au point de kits de test rapide intelligents
- Système intelligent d'information sur les quarantaines
- Données techniques des téléphones portables pour la recherche des contacts
- Amélioration du diagnostic et de la classification des patients par l'IA
- Applications mobiles pour le partage d'informations

Robotique

La pandémie du coronavirus a accru la nécessité d'appliquer la robotique comme technologie efficace dans la lutte contre la COVID-19. Il a été envisagé d'utiliser des robots pour la désinfection, l'administration de médicaments et de nourriture, la surveillance des patients à distance, la stérilisation et le nettoyage, afin de réduire les contacts entre humains et le risque d'infection de l'ensemble du personnel médical. En outre, ces robots peuvent travailler 24 heures sur 24, 7 jours sur 7, et ne sont ni infectés ni fatigués. Ils sont donc une précieuse alternative dans le cadre de la pénurie générale de personnel médical et de soutien lors des pandémies. Les robots servent de barrière protectrice entre le personnel de santé et le patient afin de réduire la contamination par des agents pathogènes en chirurgie (Zemmar *et al.*, 2020).

Santé numérique

Les applications de la santé numérique se sont multipliées dans le cadre de la lutte contre la COVID-19. La santé numérique connecte les personnes et leur donne les moyens de gérer leur santé et leur bien-être, avec l'aide de prestataires accessibles et attentifs travaillant dans des environnements de soins intégrés, interconnectés et numériques qui exploitent stratégiquement les outils, les technologies et les services numériques en vue de transformer la prestation des soins de santé (Snowdon, 2020). Les éléments clés de la santé numérique sont entre autres : les systèmes d'information sur la santé, la télésanté et la médecine personnalisée, avec des logiciels, des capteurs intelligents, la connectivité, l'Internet des objets, l'IA, l'apprentissage machine et des plateformes informatiques efficaces. Tous ces éléments permettent d'accroître l'efficacité, d'améliorer la collecte des données, d'assurer des soins efficaces dans les meilleurs délais, de communiquer des données à divers segments de la population, garantissant ainsi l'équité, la réduction des coûts et la personnalisation des médicaments pour les patients (FDA, 2020). La santé numérique se révèle très bénéfique pour les patients, les médecins, les infirmières, les kinésithérapeutes, les cliniques, les hôpitaux, les prestataires de soins de santé et les organismes gouvernementaux.

Isolement

La lutte contre la COVID-19 comporte des étapes essentielles, notamment le dépistage, l'isolement, le traitement et la recherche des contacts. L'isolement des patients infectés est en effet primordial pour garantir une sécurité maximale. Les étapes essentielles telles que l'éloignement physique, l'utilisation d'un EPI approuvé et une période de quarantaine de quatorze jours doivent être respectées. Des modèles innovants de chambres et d'enceintes d'isolement ont été expérimentés et des solutions pratiques ont été mises en œuvre. Les EPI destinés aux soignants des patients infectés par la COVID-19 consistent en des masques faciaux, des filtres de respirateur N95 approuvés par le NIOSH, des masques protecteurs, des protections oculaires et des blouses et gants médicaux jetables. Dans la phase initiale de la pandémie, les EPI disponibles n'étaient pas en mesure

⁴ Correspondance privée de Gong Ke incluse dans cette section sur l'IA.

de répondre à la demande en augmentation rapide. Les organismes gouvernementaux, en partenariat avec des entreprises privées, ont donc mis au point une méthode de fabrication accélérée qui a permis d'équiper des unités COVID, des hôpitaux et des centres de soins de longue durée en imprimantes 3D. Grâce à des approches ingénieuses en matière de conception de produits, il a été possible de fournir les EPI et les installations d'isolement indispensables pour lutter contre la COVID-19. Avec la collaboration d'ingénieurs et d'experts issus de plusieurs disciplines, plusieurs « hôpitaux temporaires » ont été conçus, construits et mis en service pour traiter les patients atteints de COVID-19.

contacts de leurs utilisateurs. Lorsque B, C et D sont avertis que A est infecté, ils doivent passer un test COVID-19 (Hsu, 2020). Ce concept a été mis en œuvre avec succès avec « TraceTogether » à Singapour et HOIA en Estonie (Petrone, 2020). Si le sujet est testé juste après l'exposition au COVID-19, même les tests PCR très sensibles peuvent être négatifs. La période d'apparition moyenne des symptômes est de cinq jours après l'exposition, et le sujet atteint le pic d'infectiosité deux jours avant et un jour après l'apparition des symptômes (Redford, 2020).

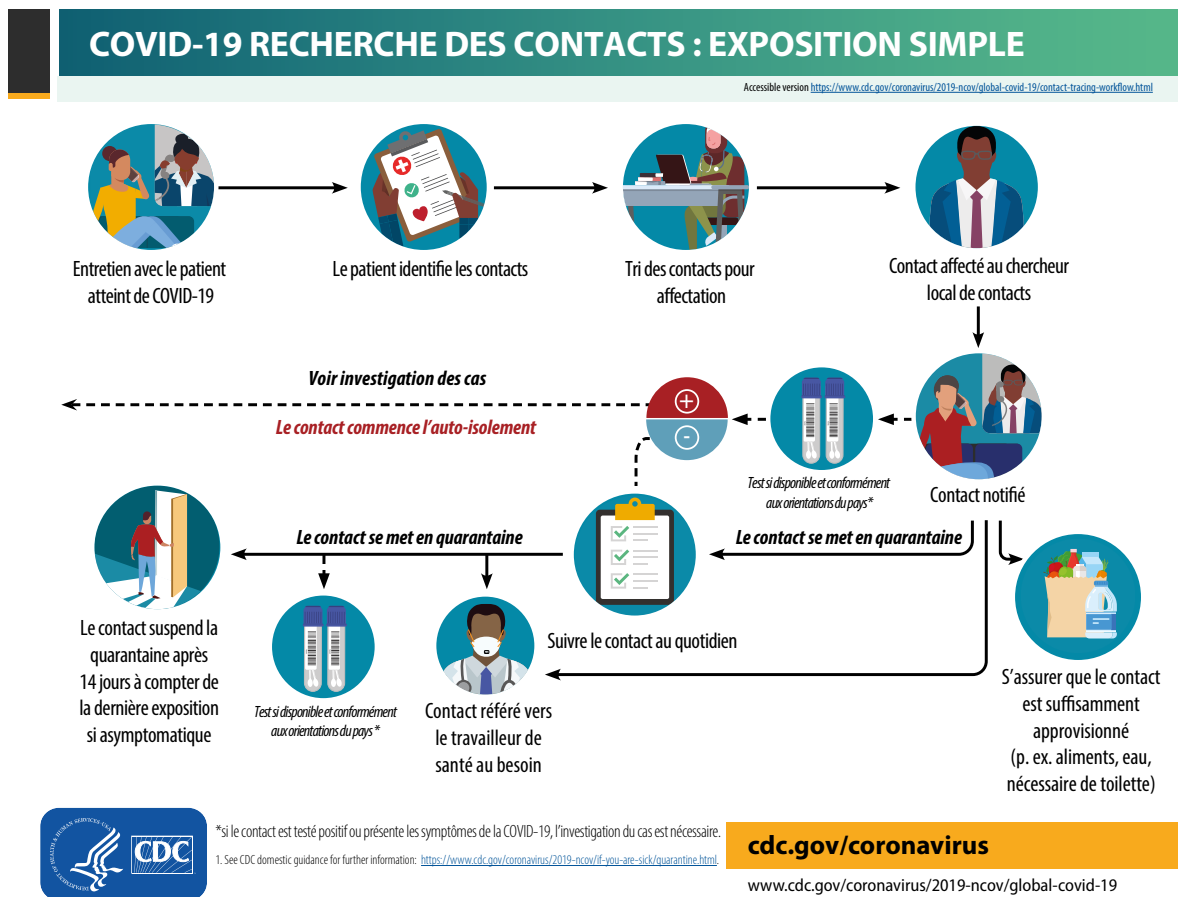
La Corée du Sud a mis en place un système centralisé qui permet de surveiller les mouvements des patients, d'identifier les personnes qui ont été en contact avec les patients et d'utiliser des applications pour surveiller les personnes en quarantaine. Les traceurs de contacts avaient accès à de multiples sources d'informations, notamment les images des caméras de sécurité, les données des stations de base mobiles et les données des transactions par carte de crédit. L'épidémie de COVID-19 y a été maîtrisée avec succès sans fermetures des frontières nationales ou mise en place de mesures de restriction (Hsu, 2020).

Les étapes du cycle d'un modèle de recherche des contacts partiellement automatisé sont la notification rapide de l'exposition, l'entretien avec le contact, les instructions de quarantaine/d'isolement, le test des instructions de quarantaine/d'isolement, l'évaluation des besoins d'aide à la mise en quarantaine volontaire, la surveillance médicale, les instructions de surveillance et d'isolement et la clôture (figure 2).

Recherche des contacts

La recherche des contacts est essentielle pour lutter contre la propagation de la COVID-19. Il s'agit d'un processus permettant d'identifier, de surveiller et de soutenir les personnes qui ont pu être exposées à une personne atteinte de COVID-19. L'une des méthodes de recherche des contacts consiste en une personne A qui sort avec un téléphone à la fonctionnalité Bluetooth activée qui communique avec les autres téléphones grâce à une clé numérique. La personne A entre en contact avec les personnes B, C et D ; tous leurs téléphones échangent des codes clés. Lorsque la personne A apprend qu'elle a été infectée, son statut est mis à jour dans l'application et envoyé à la base de données via le cloud. Pendant ce temps, les téléphones de B, C et D consultent régulièrement la base de données du cloud pour connaître le statut des

Figure 2. Cycle de recherche des contacts



Reconfiguration des installations et apprentissage à distance

Des approches d'ingénierie et de nouvelles configurations ont été conçues et mises en œuvre dans des hôpitaux, des écoles et des collèges. La réaffectation des étudiants et des professeurs dans les laboratoires et les salles de classe a été assez difficile. Un programme de réduction de la taille des effectifs a été nécessaire dans les bureaux et les lieux publics tels que les bibliothèques, les restaurants, les gymnases et les centres religieux. Des applications bien pensées de vidéoconférence comme Zoom ont été d'une grande aide à toutes les personnes impliquées dans les écoles, les lycées et les universités, favorisant ainsi le recours généralisé à l'apprentissage à grande échelle. Sans environnements d'apprentissage virtuels et hybrides, les apprenants de tous âges, ainsi que leurs éducateurs et administrateurs, n'auraient pas été en mesure de remplir leurs fonctions. Les progrès de l'ingénierie et de la technologie ont contribué de manière significative à maintenir la « vie » dans une certaine logique de normalité.

Applications de multiples technologies émergentes

Les technologies émergentes comme les réseaux 5G, l'Internet des objets médicaux, la télésanté, la santé mobile, les nanotechnologies, la fabrication d'additifs, les circuits imprimés flexibles, les capteurs portables, l'informatique dématérialisée, l'IA, l'apprentissage automatique, l'analyse de prédiction, la cybersécurité et la médecine de précision, seront appliquées de manière appropriée pour répondre aux besoins de la lutte contre la COVID-19, ainsi que pour améliorer les soins de santé pour tous. Les technologies logistiques utilisées par Amazon, FedEx, UPS, entre autres, ont grandement facilité le transport efficace des fournitures, notamment les EPI, les respirateurs, les médicaments et les fournitures essentiels aux sites des utilisateurs, jouant ainsi un très grand rôle dans la lutte contre la COVID-19. Dans le cadre clinique, les ingénieurs biomédicaux ont mis en place un système efficace de gestion des lits afin de réduire les temps d'attente en accélérant la sortie et l'admission des patients, en raccourcissant la durée du séjour, en améliorant l'efficacité de la prise en charge et en réduisant les coûts. L'analyse des données sur les patients atteints de COVID-19 suggère un impact disproportionné sur le groupe à faible revenu et la population âgée, en particulier avec les conditions préexistantes dans les maisons de soins. Grâce aux ressources du gouvernement et du secteur privé, l'opération Warp Speed (OWS)⁵ a permis d'accélérer les essais, l'approvisionnement, le développement et la distribution de vaccins, de traitements et de moyens de diagnostic sûrs et efficaces pour lutter contre la COVID-19.

Le génie biomédical dans la réalisation de l'ODD 3

L'Objectif de développement durable 3 (ODD 3) vise à « permettre à tous de vivre en bonne santé et [à] promouvoir le bien-être de tous à tout âge ». Le génie biomédical offre des outils, des techniques, des dispositifs et des systèmes destinés à faciliter le diagnostic, le traitement et la guérison des maladies et à garder les gens en bonne santé. Les efforts dévoués des ingénieurs biomédicaux en collaboration avec d'autres ingénieurs et scientifiques ont contribué à mettre fin aux épidémies de sida, de tuberculose, de paludisme et à lutter contre l'hépatite et d'autres maladies transmissibles, en plus de réduire la mortalité maternelle mondiale et la mortalité prématurée due aux maladies non transmissibles⁶.

Les dispositifs médicaux portables peuvent être utilisés pour suivre la corrélation entre les comportements des patients et les résultats. Les ingénieurs peuvent soutenir le système de santé en favorisant la prévention. Les efforts conjoints d'experts en ingénierie coopérant avec de nombreux chercheurs des sciences de la vie, de la médecine, des entreprises et des organismes de réglementation ont contribué à des actions concrètes pour traiter et prévenir les maladies. Il est prévu que les ingénieurs et les technologies jouent un rôle important dans le maintien de la santé des personnes et la promotion du bien-être pour tous à tout âge.

Défis

En raison de l'augmentation du nombre total de cas confirmés, d'hospitalisations et de décès dus au virus, les hôpitaux et les systèmes de santé ont subi des ravages financiers, ce qui a eu un impact négatif sur les opérations. L'arrêt des chirurgies électives et des services non essentiels a eu des effets durables et a déclenché aux États-Unis un besoin vital de financement au niveau fédéral. Si les résultats des essais cliniques démontrent la sécurité d'emploi et l'efficacité de plusieurs vaccins, la fabrication à grande échelle, la distribution, la hiérarchisation et la vaccination de masse sont autant de défis majeurs à relever, ceci dans le respect des directives des diverses formes de gouvernance en matière de santé publique dans les différents pays. Les cas sévères de COVID-19 ont entraîné une grave pénurie et un besoin croissant de lits dans les unités de soins intensifs, ainsi qu'une assistance respiratoire invasive et non invasive dans les unités de soins intensifs.

Parmi les principaux défis rencontrés dans le domaine de la santé numérique, on compte la culture numérique, des logiciels robustes, la formation, l'interopérabilité, l'inégalité des ressources, le financement et une main-d'œuvre qualifiée (Taylor, 2019). La transition pendant la pandémie vers un système de travail solitaire et à distance, sans interactions sociales, risque d'entraîner une

5 Pour en savoir plus sur l'opération Warp Speed du Ministère américain de la Défense, consulter le site <https://www.defense.gov/Explore/Spotlight/Coronavirus/Operation-Warp-Speed>

6 Pour en savoir plus sur l'ODD 3, consulter le site : <https://sdgs.un.org/goals/goal3>

détérioration de la santé mentale générale. En outre, la prestation de cours virtuels peut poser des problèmes en matière d'apprentissage et d'enseignement. Il y a eu des cas de problèmes de santé mentale résultant du stress provoqué par l'apprentissage à distance. L'impact à long terme des résultats de l'apprentissage reste à déterminer.

Certains des principaux obstacles au respect des directives réglementaires sont liés à des questions pratiques, à l'égoïsme de certains et à un transfert de responsabilité. Si les technologies émergentes sont adaptées aux applications de soins de santé, leur mise en œuvre à plus grande échelle nécessite une collaboration efficace entre les secteurs d'ingénierie et de santé mondiale, associée à une coopération de la communauté mondiale aux ressources diverses et inévitables (Clifford et Zaman, 2016). L'analyse en temps utile et le partage d'informations précieuses collectées à l'aide de technologies intelligentes et de plateformes logicielles sont essentiels pour que les dirigeants puissent atténuer et contrôler la propagation de la COVID-19, traiter les patients et planifier le bien-être du public aux niveaux régional et national.

Conclusion

Des ingénieurs issus de plusieurs disciplines ont travaillé en collaboration avec des scientifiques, des médecins, du personnel de santé, des mathématiciens et d'autres experts pour concevoir, développer et mettre en œuvre des stratégies de solution et des approches de lutte contre les problèmes multidimensionnels inédits résultant de la COVID-19. Cette collaboration a été couronnée de succès, et ces efforts continus et innovants se poursuivront grâce à des initiatives concrètes pour atténuer les effets désastreux de la pandémie. Les chercheurs issus d'universités, d'industries et de centres gouvernementaux collaborent toujours avec des équipes multidisciplinaires et forment des partenariats public-privé dans le but d'utiliser les technologies émergentes et de développer des solutions intelligentes visant à améliorer la qualité de la vie humaine et à garantir la santé et le bien-être de toutes les personnes de tous âges et partout.

Recommandations

Voici présentées quelques recommandations fondées sur l'ingénierie visant à améliorer les soins de santé :

1. Des efforts cohésifs et concertés entrepris à travers les multiples couches et sphères de l'écosystème du système de santé pour l'amélioration des soins de santé pour tous.
2. L'adoption et la mise en œuvre des avancées technologiques pour aider à la détection, au diagnostic, au traitement, à l'analyse des données et à la réadaptation des patients infectés par la COVID-19 et des personnes atteintes d'autres maladies.
3. De nouvelles techniques permettant de mettre en œuvre plusieurs processus dans le domaine des soins de santé à une vitesse plus rapide, avec une plus grande précision et à un coût moindre devront être développées et mises à la disposition de tous.
4. À l'instar d'approches innovantes utilisées pour lutter contre la pandémie, des procédés ultrarapides doivent être employés dans la conception, le développement, la fabrication et la mise en œuvre de moyens de préparation à de nouveaux défis.
5. Les membres multinationaux de la Fédération internationale du génie médical et biologique (IFMBE)⁷ issus du milieu universitaire, des industries biomédicales et des systèmes de soins de santé, ainsi que des organisations réglementaires, gouvernementales et non gouvernementales, doivent continuer à contribuer à l'élaboration de solutions efficaces dans la lutte contre les problèmes complexes posés par la pandémie, ainsi qu'à la préservation de la santé et du bien-être de tous.

⁷ Site Web officiel de la Fédération internationale du génie médical et biologique : <https://ifmbe.org/>

Références

- Adans-Dester, C.P. et al. 2020. Can mHealth technology help mitigate the effects of the COVID-19 pandemic? *IEEE Open Journal of Engineering in Medicine and Biology*, vol. 1, pp. 243-248.
- Andellini, M., De Santis, S., Nocchi, F. et al. 2020. Clinical needs and technical requirements for ventilators for COVID-19 treatment critical patients: an evidence-based comparison for adult and pediatric age. *Health and Technology*, vol. 10, pp. 1403-1411.
- Aydemir, F. 2020. Can IoMT help to prevent the spreading of new coronavirus? *IEEE Consumer Electronics Magazine*, vol. 10, n° 2.
- Bokolo, A. Jnr, Nweke, L. O. et Al-Sharafi, M. A. 2020. Applying software-defined networking to support telemedicine health consultation during and post Covid-19 era. *Health and Technology*, novembre, pp. 1-9.
- Brodwin, E. et Ross, C. 2020. Surge in patients overwhelms telehealth services amid coronavirus pandemic. *STAT News*, 17 March. <https://www.statnews.com/2020/03/17/telehealth-services-overwhelmed-amid-coronavirus-pandemic>
- CAE. 2019. *Engineering Fronts 2019*. Centre d'études stratégiques, Académie chinoise d'ingénierie. <http://devp-service.oss-cn-beijing.aliyuncs.com/f0f94d402c8e4435a17e109e5fbbafe2.pdf>
- CDC. 2020. Contact tracing for COVID-19. Centers for Disease Control and Prevention. <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/php/contact-tracing/contact-tracing-plan/contact-tracing.html>
- Celic, L. et Magjarevic, R. 2020. Seamless connectivity architecture and methods for IoT and wearable devices. *Automatika*, vol. 61, n° 1, pp. 21-34.
- Choong, Y.Y.C., Tan, H.W., Patel, D.C. et al. 2020. The global rise of 3D printing during the COVID-19 pandemic. *Nature Review Materials*, vol. 5, pp. 637-639.
- Clifford, K.L. et Zaman, M.H. 2016. Engineering, global health, and inclusive innovation: focus on partnership, system strengthening, and local impact for SDGs. *Global Health Action*, vol. 9, n° 1.
- ECDC. 2020. Options for the use of rapid antigen tests for COVID-19 in the EU/EEA and the UK. European Centre for Disease Prevention and Control, 19 novembre. <https://www.ecdc.europa.eu/sites/default/files/documents/Options-use-of-rapid-antigen-tests-for-COVID-19.pdf>
- FDA. 2020. What is Digital Health? *U.S. Food & Drug Administration*, 22 September. <https://www.fda.gov/medical-devices/digital-health-center-excellence/what-digital-health>
- Ford. 2020. Ford to Produce 50,000 ventilators in Michigan in next 100 days; Partnering with GE Healthcare will help coronavirus patients. *Ford*, 30 mars. <https://corporate.ford.com/articles/products/ford-producing-ventilators-for-coronavirus-patients.html>
- Golinelli, D., Boetto, E., Carullo, G., et al. 2020. Adoption of digital technologies in health care during the COVID-19 pandemic: Systematic review of early scientific literature. *J. Med. Internet Res.* vol. 22, No. 11.
- Hsu, J. 2020. Contact tracing apps struggle to be both effective and private. *IEEE Spectrum*, 24 septembre. <https://spectrum.ieee.org/biomedical/devices/contact-tracing-apps-struggle-to-be-both-effective-and-private>
- Kannampallil, T. et Ma, J. 2020. Digital translucence: Adapting telemedicine delivery post-COVID-19. *Telemedicine and e-Health*, vol. 26, n° 9, pp. 1120-112.
- Ohannessian, R., Duong, T.A. et Odone, A. 2020. Global telemedicine implementation and integration within health systems to fight the COVID-19 pandemic: A call to action. *JMIR Public Health Surveillance*, vol. 6, n° 2, e18810.
- OMS. 2020a. Statement on the second meeting of the International Health Regulations (2005) Emergency Committee regarding the outbreak of the novel coronavirus (2019-nCoV). World Health Organization, 30 janvier. [https://www.who.int/news/item/30-01-2020-statement-on-the-second-meeting-of-the-international-health-regulations-\(2005\)-emergency-committee-regarding-the-outbreak-of-novel-coronavirus-\(2019-ncov\)](https://www.who.int/news/item/30-01-2020-statement-on-the-second-meeting-of-the-international-health-regulations-(2005)-emergency-committee-regarding-the-outbreak-of-novel-coronavirus-(2019-ncov))
- OMS. 2020b. Priority medical devices list for the COVID-19 response and associated technical specifications. Organisation mondiale de la santé. <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-2019-nCoV-MedDev-TS-O2TV2>
- OMS. 2020c. Technical specifications of personal protective equipment for COVID-19. Organisation mondiale de la santé, 13 novembre. https://www.who.int/publications/i/item/WHO-2019-nCoV-PPE_specifications-2020.1
- Petrone, J. 2020. Estonia's coronavirus app HOIA – the product of a unique, private-public partnership. *e-Estonia*, septembre. <https://e-estonia.com/estonias-coronavirus-app-hoia-the-product-of-a-unique-private-public-partnership/>
- Ramsetty, A. et Adams, C. 2020. Impact of the digital divide in the age of COVID-19. *J Am Med Inform Assoc.*, vol. 27, n° 7, pp. 1147-1148.
- Redford, G. 2020. Your COVID-19 testing questions – answered. *AAMC*, 5 October. <https://www.aamc.org/news-insights/your-covid-19-testing-questions-answered>
- Snowdon, A. 2020. HIMSS defines digital health for the global healthcare industry. <https://www.himss.org/news/himss-defines-digital-health-global-healthcare-industry>
- Sonkin, R., Alpert, E.A. et Jaffe, E. 2020. Epidemic investigations within an arm's reach – role of google maps during an epidemic outbreak. *Health and Technology*, vol. 10, pp. 1397-1402.
- Taylor, K. 2019. Shaping the future of UK healthcare: Closing the digital gap. *Deloitte*, 1 November. <https://blogs.deloitte.co.uk/health/2019/11/shaping-the-future-of-uk-healthcare-closing-the-digital-gap.html>
- USPHSC. 2020. Optimizing ventilator use during the COVID-19 pandemic. U.S. Public Health Service Commissioned Corps. <https://www.hhs.gov/sites/default/files/optimizing-ventilator-use-during-covid19-pandemic.pdf>
- Venkatesan, A., Rahimi, L., Kaur, M. et Mosunic, C. 2020. Digital cognitive behaviour therapy intervention for depression and anxiety: Retrospective study. *JMIR Mental Health*, vol. 7, n° 8, e21304.
- Webster, P. 2020. Virtual health care in the era of COVID-19. *The Lancet Digital Health*, vol. 395, n° 10231, pp. 1180-1181.
- Zemmar, A., Lozano, A.M. et Nelson, B.J. 2020. The rise of robots in surgical environments during COVID-19. *Nature Machine Intelligence*, vol. 2, pp. 566-572.

José Vieira⁸

3.2 INGÉNIERIE DES RESSOURCES EN EAU POUR LE DÉVELOPPEMENT DURABLE



© Bridges to Prosperity

Suspended footbridge in Haiti

⁸ Président-elect, Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs.

L'ingénierie au service du développement durable

Les Objectifs de développement durable des Nations Unies (ODD) sont soutenus par les progrès scientifiques et technologiques dans la mise en œuvre de politiques et d'actions pour la paix et la prospérité, pour les populations et pour la survie de toutes les formes de vie sur Terre.

L'eau, en tant que condition préalable à la vie, revêt une importance particulière en termes de développement durable. Les problèmes liés à l'eau à travers le monde, notamment les sécheresses et les inondations, la pollution causée par des événements naturels et anthropiques tels que les pluies extrêmes, l'élévation du niveau des mers et des rivières, les feux de brousse et les effluents domestiques et industriels non traités, constituent des enjeux majeurs à l'échelle mondiale qui nécessitent une gestion adéquate et efficace de l'eau afin de répondre à la demande croissante en eau potable.

Les changements hydrologiques induits par les changements climatiques poseront des défis à la gestion durable des ressources en eau déjà soumises à une forte pression dans de nombreuses régions du monde, aggravant la situation des régions qui connaissent déjà un stress hydrique, tout en générant un stress hydrique dans les régions où les ressources en eau sont encore abondantes aujourd'hui.

L'ODD 6 sur l'eau propre et l'assainissement vise un accès universel à l'eau propre et à l'assainissement d'ici à 2030. Selon les statistiques des Nations Unies pour 2017, et malgré les progrès réalisés, on estime que 2,2 milliards et 4,2 milliards de personnes manquent encore respectivement d'eau potable et d'installations sanitaires décentes. Ces dernières années, une nouvelle approche, connue sous l'acronyme WASH (eau, assainissement et hygiène), intègre le lavage des mains comme élément principal des bonnes pratiques d'hygiène, une méthode qui s'est avérée efficace pour

prévenir la propagation de la COVID-19. On estime toutefois que 3 milliards de personnes ne disposent toujours pas d'installations de base pour se laver les mains à la maison, ce qui peut avoir des conséquences négatives sur la prévention de la COVID-19.

Au rythme actuel des progrès, la mise en œuvre à l'échelle mondiale de l'approche WASH ne sera pas effective avant longtemps dans un grand nombre de pays en développement. Ces pays connaissent également une urbanisation rapide et souvent non planifiée qui a mis à rude épreuve les services d'approvisionnement en eau potable et d'assainissement. L'accès à l'eau potable et à un assainissement décent étant reconnu comme un droit humain fondamental par les Nations Unies, des pressions sont exercées sur les autorités locales et nationales afin que celles-ci respectent leurs engagements politiques et sociaux. L'ingénierie peut aider à trouver des solutions innovantes pour les infrastructures physiques d'approvisionnement en eau et d'assainissement, en combinant les approches traditionnelles des grands systèmes centralisés avec des solutions décentralisées sans égouts, et en allant d'une conception plus efficace des fosses septiques à des toilettes sans eau.

L'ingénierie des ressources en eau touche plusieurs disciplines et bénéficie des progrès de l'innovation technologique dans des domaines tels que la microélectronique, la nanotechnologie, la chimie fine, la biotechnologie, l'acquisition de données, l'observation de la terre par satellite, la modélisation hydro-environnementale et la télédétection.

Le présent chapitre donne des exemples de contributions dans le domaine de l'ingénierie qui répondent à ces défis mondiaux et visent à réaliser les ODD, notamment l'ODD 6, qui met en exergue les progrès mutuellement intégrés accomplis dans le domaine de l'hydrologie relativement à l'eau potable et la santé humaine.

3.2.1. Eau propre et santé humaine

José Vieira, Tomás Sancho⁹ et Sarantuyaa Zandaryaa¹⁰

Résumé. La relation étroite entre la santé humaine et le bien-être des communautés ayant accès à l'eau potable est un facteur déterminant pour le développement économique et sociétal. Si l'accès à l'eau potable et à l'assainissement a été reconnu comme un droit par les Nations Unies en 2010¹¹, il subsiste des défis majeurs pour sa mise en œuvre, en particulier dans les pays les moins développés. L'eau potable fait actuellement l'objet d'une attention sans précédent de la part des politiques publiques dans le cadre des efforts visant à contenir la propagation de la COVID-19. Les ingénieurs civils et environnementaux ont de tout temps joué un rôle prépondérant dans la conception et la construction de grands projets d'infrastructures visant à fournir de l'eau propre et des systèmes d'assainissement adéquats. Les progrès significatifs réalisés dans le domaine de l'ingénierie de l'eau et de l'environnement au cours des dernières décennies ont conduit au développement de nouvelles technologies de l'eau plus efficaces, par exemple l'oxydation avancée, l'adsorption, l'osmose inverse et la nano et ultra filtration, utilisées pour le traitement avancé de l'eau. En outre, les innovations dans les différentes disciplines de l'ingénierie telles que l'aérospatiale, la technologie des satellites, la modélisation hydro-environnementale, l'ingénierie électronique et informatique ainsi que les technologies de télédétection, contribuent toutes à identifier les tendances du cycle de l'eau, ce qui est d'une importance capitale dans l'évaluation complète des effets quantitatifs et qualitatifs des changements climatiques liés à l'eau.

Introduction

On peut affirmer que tout au long de l'histoire de l'humanité, les graves problèmes de santé publique étaient principalement dus à la transmission de maladies infectieuses par des micro-organismes pathogènes (bactéries, virus, protozoaires et helminthes), phénomène lié à l'absence d'eau salubre. Ces maladies d'origine hydrique, dues soit à l'ingestion d'aliments ou d'eau contaminés, soit à l'inhalation ou l'aspiration d'aérosols, ou encore à l'exposition à de l'eau contaminée et véhiculée par des arthropodes ou des mollusques, ont été à l'origine de graves crises de santé publique à grande échelle (Vieira, 2018).

À partir du milieu du dix-neuvième siècle, à la suite des épidémies dévastatrices de choléra et d'autres maladies gastro-intestinales en Europe, on a assisté à un changement progressif et définitif de la pensée et des attitudes à l'égard des aspects économiques, sociaux, environnementaux et sanitaires de la vie quotidienne en ce qui concerne les politiques publiques. La création de la Poor Law Commission (Commission de la loi anti-pauvres) en Grande-Bretagne en 1834, et les études développées dans le cadre de son activité (Chadwick, 1842), ont été décisives pour le génie médical et de santé publique. Cette loi constituait une réponse à la nécessité de trouver des solutions techniques en matière d'approvisionnement en eau potable et d'assainissement en milieu urbain dans le but de prévenir et de contrôler les maladies. On estimait donc qu'il serait possible de lutter plus efficacement contre les maladies en mettant en œuvre des solutions techniques de nature préventive plutôt qu'en comptant sur des interventions individuelles dans le cadre de la promotion de la santé. À cette époque, la vapeur, nouvelle source d'énergie, a permis de développer des réseaux d'eau potable et des systèmes d'égouts sanitaires révolutionnaires dans les bâtiments, en introduisant de nouvelles avancées technologiques dans les domaines de la collecte et du traitement des eaux usées, et en jouant un rôle stratégique dans la promotion de la santé en milieu urbain.

Les progrès de la médecine et des sciences microbiologiques ont d'abord permis d'identifier et d'isoler les agents pathogènes avant que les progrès de l'ingénierie ne permettent d'envisager une méthode d'eau potable. La désinfection de l'eau potable, introduite à la fin du dix-neuvième siècle, a considérablement réduit la propagation du choléra et de la fièvre typhoïde (Rose et Masago, 2007).

⁹ Président du groupe de travail sur l'eau, Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs.

¹⁰ Division of Water Sciences, UNESCO

¹¹ Dans sa résolution 64/292, le 28 juillet 2010, l'Assemblée générale des Nations Unies a reconnu le droit à l'eau et l'assainissement comme un droit de l'homme, et a reconnu que l'eau potable et l'assainissement sont essentiels à l'exercice de tous les droits de l'homme.

L'ingénierie au service du développement durable

Aujourd'hui encore, la pollution de l'eau continue de mettre à rude épreuve la santé publique en raison de l'industrialisation croissante, de l'urbanisation et de l'utilisation intensive de produits chimiques dans l'agriculture. Nous devons tirer les leçons du passé et exploiter les progrès de l'ingénierie pour résoudre les problèmes liés à la qualité de l'eau dans le monde, condition essentielle pour lutter contre les maladies hydriques émergentes et réémergentes, mais aussi pour améliorer la qualité de vie dans les sociétés modernes.

Le droit de l'homme à l'eau potable et à l'assainissement et la priorité donnée à l'eau pour le développement durable

En 2010, l'Assemblée générale des Nations Unies a reconnu le droit à l'eau potable et à l'assainissement comme un droit humain essentiel à la pleine jouissance de la vie, ce qui reflète la nature fondamentale de ces besoins de base dans la vie de chaque personne. Il a été convenu que le manque d'accès à des installations d'eau, d'assainissement et d'hygiène sûres, suffisantes et abordables a un effet dévastateur sur la santé, la dignité et la prospérité de milliards de personnes et a des conséquences importantes pour la réalisation d'autres droits de l'homme (UNESCO/ONU-Eau¹², 2020). Il s'agit d'un acte politique d'une grande importance stratégique, qui a contribué de manière décisive à donner un nouvel élan à l'échelle globale à la mise en œuvre d'investissements importants dans la construction et l'entretien des infrastructures nécessaires pour soutenir les systèmes d'approvisionnement en eau potable et d'assainissement.

À l'occasion du sommet des Nations Unies pour le développement durable en 2015, un document ambitieux, le Programme de développement durable à l'horizon 2030, a présenté une vision stratégique pour l'orientation des politiques nationales et des activités de coopération internationale à l'horizon 2030. Il propose 17 Objectifs de développement durable (ODD) visant à mettre en œuvre les principes spécifiques de la santé et de la dignité humaine et sociale dans divers domaines d'activité. L'ODD 6, par exemple, établit le principe de garantir « disponibilité et la gestion durable de l'eau et de l'assainissement pour tous ». Au-delà de l'ODD 6, plusieurs autres objectifs sont étroitement liés à l'eau, notamment l'ODD 1 (éliminer la pauvreté sous toutes ses formes), l'ODD 2 (éliminer la faim et assurer la sécurité alimentaire), l'ODD 3 (permettre à tous de vivre en bonne santé et promouvoir le bien-être de tous), l'ODD 7 (garantir l'accès de tous à des services énergétiques fiables, durables et modernes, à un coût abordable), l'ODD 11 (faire en sorte

que les villes et les établissements humains soient ouverts à tous, sûrs, résilients et durables), l'ODD 13 (lutter contre les changements climatiques) et l'ODD 15 (protéger et restaurer la biodiversité, les forêts et lutter contre la désertification).

Toutefois, malgré les progrès réalisés au cours de la dernière décennie, il subsiste des défis majeurs à relever avant sa mise en œuvre complète, notamment en ce qui concerne les pays moins développés. Les récentes estimations sur la couverture des systèmes d'approvisionnement en eau, d'assainissement et d'hygiène au sein de la population mondiale (UNICEF/OMS, 2019) révèlent en effet une relative lenteur des progrès qui laisse planer un doute sur la réalisation des objectifs proposés à l'horizon 2030 :

- *L'eau potable* : 5,3 milliards de personnes ont accès à des services d'assainissement gérés en toute sécurité. En outre, 1,4 milliard de personnes ont au moins accès aux services de base, 206 millions de personnes à des services limités, 435 millions à des sources non améliorées et 144 millions utilisent encore les eaux de surface.
- *L'assainissement* : 3,4 milliards de personnes ont accès à des services d'assainissement gérés en toute sécurité. En outre, 2,2 milliards de personnes ont au moins accès aux services de base, 627 millions de personnes à des services limités, 701 millions à des infrastructures non améliorées et 673 millions pratiquent encore la défécation en plein air.
- *L'hygiène* : 60 % de la population mondiale dispose d'installations de base pour se laver les mains avec de l'eau et du savon à domicile. Trois milliards de personnes n'ont toujours pas d'installations de base pour se laver les mains à la maison, 1,6 milliard de personnes ont des installations limitées, manquant de savon ou d'eau, et 1,4 milliard n'ont aucune installation du tout.

Cette analyse saisissante met en lumière la réalité sur le plan de l'hygiène et de la santé de milliards de personnes dans le monde, révélant les énormes inégalités mondiales entre les pays développés et les pays les moins avancés, avec de graves répercussions sociales, économiques et de santé publique pour ces populations.

Pour accélérer la réalisation de l'ODD 6¹³ qui a pris un retard alarmant, les Nations Unies ont lancé le Cadre mondial d'accélération de l'ODD 6 afin d'aider les pays à progresser rapidement vers les cibles nationales de l'ODD 6 et, ce faisant, de contribuer à la concrétisation du Programme 2030, notamment à travers la réduction de la pauvreté, la sécurité alimentaire, la santé et le bien-être, l'égalité des sexes, la paix et la justice, la durabilité et la résilience climatique des communautés, des écosystèmes et des systèmes de production.

Il contribue à la réalisation des droits de l'homme en matière d'eau et d'assainissement. Il s'appuie sur les initiatives

12 Site officiel d'ONU-Eau : <https://www.unwater.org>

13 Pour en savoir plus sur le Cadre mondial d'accélération de l'ODD 6, consultez le site <https://www.unwater.org/publications/the-sdg-6-global-acceleration-framework>

en cours, notamment la Décennie d'action 2018-2028 consacrée à l'eau, ainsi que sur l'appel mondial à l'action pour l'eau, l'assainissement et l'hygiène (WASH) dans tous les établissements de santé lancé par le Secrétaire général des Nations Unies, et sur l'Agenda pour l'humanité¹⁴.

Travaux d'ingénierie en réponse aux défis liés à l'eau propre

Afin d'assurer la sécurité de l'eau, de réaliser l'ODD 6 et de renforcer la résilience aux changements climatiques, le secteur de l'ingénierie offre les connaissances et la technologie nécessaires à une gouvernance et une gestion efficaces de l'eau.

Près d'un dixième de la charge totale des maladies d'origine hydrique dans le monde pourrait être évité par une meilleure gestion de l'eau potable, de l'assainissement, de l'hygiène et des ressources en eau. Les exemples suivants concernent des maladies dans le monde qui peuvent être évitées si ces conditions sont remplies : la diarrhée, (1,4 million de décès d'enfants par an pouvant être évités) ; la malnutrition (860 000 décès d'enfants par an pouvant être évités) ; les infections par les nématodes intestinaux (2 milliards d'infections touchant un tiers de la population mondiale) ; la filariose lymphatique (25 millions de personnes gravement handicapées) ; la schistosomiase (200 millions de personnes atteintes d'infections pouvant être évitées) ; le trachome (déficiences visuelles chez 5 millions de personnes) ; et le paludisme (un demi-million de décès par an pouvant être évités) (OMS, 2019).

En plus de ces maladies hydriques bien connues, il est possible d'anticiper les menaces biologiques émergentes et futures, notamment : i) d'autres maladies connues qui peuvent resurgir ; ii) de « nouvelles » maladies identifiées grâce à de nouvelles méthodes cliniques plus sophistiquées ; iii) de véritables nouvelles maladies ; iv) des changements dans le comportement des maladies ; v) des changements dans les conditions environnementales ; et vi) l'émergence éventuelle de micro-organismes résistant à différents médicaments.

Les changements climatiques prévus peuvent encore faire empirer la situation, bien que la propagation de ces maladies reste jusqu'à présent peu probable. Toutefois, la probabilité de propagation des maladies infectieuses par le biais d'arthropodes vecteurs augmente avec la hausse des températures de l'eau. Des régions telles que l'Europe et l'Amérique du Nord, auparavant trop froides pour favoriser la transmission, pourraient connaître une inversion de cette tendance avec la hausse des températures de l'eau qui créerait des conditions favorables à la reproduction des vecteurs susmentionnés.

Les polluants chimiques nouveaux et émergents sont omniprésents dans les ressources en eau et l'environnement.

On compte notamment : i) les déchets pharmaceutiques ; ii) les composés perturbateurs du système endocrinien ; iii) les nitrosamines ; iv) les pesticides ; v) les biocides ; vi) les toxines d'algues/cyanobactéries ; vii) les produits d'hygiène personnelle ; viii) les parfums, etc. Pour la majorité de ces polluants, il n'existe aucune information sur leurs effets sur la santé humaine, et leur écotoxicologie ne figure pas dans les listes officielles de paramètres pour la surveillance régulière de la qualité de l'eau. De plus, il n'existe aucune preuve de comportement de ces substances prioritaires au cours des processus de traitement de l'eau et des eaux usées.

Les solutions aux problèmes complexes liés à l'eau potable ont été abordées dans une perspective multidisciplinaire par des ingénieurs de différentes disciplines, appliquant les connaissances scientifiques et apportant des solutions innovantes aux problèmes mondiaux liés à l'eau. Les ingénieurs civils ont de tout temps joué un rôle essentiel dans la construction de grands projets d'infrastructure et dans le développement des ressources en eau. D'autres disciplines de l'ingénierie, telles que le génie mécanique, chimique, biologique, environnemental, agricole, électronique et informatique, ont également apporté leur contribution en proposant de nouvelles solutions technologiques et en améliorant les options des politiques de gestion durable de l'eau (encadré 1).

Outre la conception des infrastructures hydrauliques (barrages et réservoirs, canaux, conduites, stations de pompage, stations de traitement des eaux), l'ingénierie contribue également d'une part à la technification des systèmes, leur fournissant une « intelligence » qui permet une meilleure exploitation et une meilleure gestion grâce à la recherche et au développement, et d'autre part au transfert de connaissances (Trevelyan, 2019). Elle contribue également à :

- soutenir la gouvernance de l'eau par une approche de gestion intégrée des ressources en eau ;
- améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau et réduire les pertes dans les réseaux de distribution municipaux et les processus de refroidissement industriels et énergétiques ;
- mettre en œuvre des solutions basées sur la nature dans les rivières, les aquifères et le drainage en milieu urbain ;
- protéger et restaurer les écosystèmes hydriques ;
- créer des ressources en eau alternatives, comme la réutilisation sûre des eaux usées (une importante ressource inexploitée utile aux secteurs de l'industrie et de l'agriculture), le ruissellement des eaux pluviales et le dessalement, susceptibles de soulager le stress hydrique ; et
- évaluer et maîtriser les risques d'événements extrêmes (inondations et sécheresses), qui sont des phénomènes naturels à l'origine d'importantes pertes humaines et économiques.

14 Pour en savoir plus sur l'Agenda pour l'humanité, consulter le site <https://agendaforhumanity.org>

L'ingénierie au service du développement durable

Les progrès considérables réalisés dans le domaine de l'ingénierie de l'eau et de l'environnement au cours des dernières décennies ont conduit au développement de nouvelles technologies de l'eau plus efficaces, comme l'oxydation avancée, l'adsorption, l'osmose inverse et la nano et ultra filtration, utilisées pour le traitement avancé de l'eau.

Les processus de traitement des eaux usées ont été améliorés et permettent d'éliminer les substances utilisables (par exemple, le phosphore et l'ammonium) et d'autres produits destinés à des processus de traitement ultérieur, notamment l'utilisation de la matière organique pour produire du biogaz ou des produits chimiques de base qui peuvent être utilisés dans l'industrie pharmaceutique, et des progrès ont également été réalisés en matière de promotion d'une économie circulaire tout en empêchant le rejet de substances nocives dans les ressources en eau et l'environnement.

L'Internet des objets, l'intelligence artificielle, les nouveaux algorithmes d'analyse et de contrôle basés sur les données contribuent actuellement à transformer les systèmes d'eau, des éléments d'infrastructure urbaine passifs et à usage unique, en des unités actives et adaptatives plus efficaces, plus innovantes et plus durables.

Les innovations dans les disciplines d'ingénierie, telles que l'aérospatiale, la technologie des satellites, le génie électronique et informatique, ainsi que dans les technologies de télédétection contribuent à identifier les tendances du cycle de l'eau, ce qui est d'une importance capitale pour l'évaluation complète des effets quantitatifs et qualitatifs des changements climatiques liés à l'eau.

Encadré 1. Contributions innovantes de l'ingénierie aux problèmes liés à l'eau dans le monde

Les progrès de l'ingénierie offrent des solutions innovantes aux défis mondiaux liés à l'eau, fournissent des informations essentielles sur la gestion durable des ressources en eau, appuient la recherche scientifique sur les questions nouvelles liées à l'eau et favorisent la prise de décisions fondées sur la science en matière d'eau. Par ailleurs, les progrès de l'ingénierie peuvent aider à atténuer et à anticiper les futurs défis liés à l'eau, et contribuer à une évaluation complète des impacts des changements climatiques liés à l'eau.

- *Progrès en matière de génie chimique et d'analyse environnementale.* Ces progrès ont contribué au développement d'outils d'analyse à large spectre et de haute précision, qui ont mis en évidence la présence de types de polluants toujours plus nombreux dans les ressources en eau et ont permis de détecter et d'évaluer quantitativement de nouveaux polluants dont la présence dans l'environnement n'était pas connue auparavant. Grâce à des appareils d'analyse de haute précision et de haute sensibilité, il est également devenu possible de détecter des polluants à des concentrations beaucoup plus faibles que celles détectables avec les techniques conventionnelles de faible sensibilité utilisées dans le passé.
- *Progrès dans le domaine du génie biochimique.* Les technologies avancées d'oxydation et d'adsorption fournissent des solutions pour le prétraitement de polluants spécifiques tels que les résidus pharmaceutiques et les produits chimiques dans les eaux usées des hôpitaux et des installations industrielles avant leur déversement dans les égouts municipaux.
- *Innovations dans le domaine du génie de l'environnement.* Les technologies de pointe en matière de génie de l'environnement, telles que l'ultrafiltration, la nano filtration et l'osmose inverse, sont utilisées dans le traitement avancé de l'eau et des eaux usées et se sont également révélées efficaces pour éliminer les nouveaux polluants des eaux usées.
- *Progrès dans le domaine de la télédétection.* Des capteurs sans fil ont été développés pour surveiller la consommation d'eau et sont de plus en plus utilisés pour permettre le comptage de l'eau à distance. Le domaine de l'acquisition de données a pu évoluer grâce aux réseaux Internet à haut débit et à une meilleure couverture mondiale, ainsi qu'à l'informatique dématérialisée et au renforcement des capacités de stockage virtuel. Les applications d'analyse des données massives peuvent aider à obtenir des connaissances grâce au traitement des flux continus d'informations et de données relatives à l'eau. Le crowdsourcing et les autres sciences participatives peuvent contribuer aux systèmes d'alerte anticipée et fournir des données pour valider les modèles de prévision des inondations.
- *Innovations en matière de modélisation hydro-environnementale.* Des modèles spécifiques et avancés ont été développés pour la gestion intégrée des ressources en eau, les inondations et les sécheresses, l'écoulement des précipitations et la recharge des aquifères, l'estimation des plaines d'inondation, la prévision des dommages, la résilience des infrastructures, l'optimisation énergétique et économique.
- *Progrès dans le domaine de l'ingénierie aérospatiale et des satellites.* L'observation de la Terre par satellite peut aider à identifier les tendances des précipitations, de l'évapotranspiration, de la couverture/fonte de neige et de glace ainsi que de l'écoulement de surface et du stockage, y compris les niveaux d'eaux souterraines. L'utilisation de l'imagerie d'OT, associée aux progrès rapides de l'ingénierie informatique, offre un potentiel immense pour la surveillance de la qualité de l'eau au niveau des bassins et aux niveaux national, régional et mondial. Le lancement de satellites environnementaux avancés a amélioré la résolution spatiale des images satellites et a élargi les horizons de la recherche sur la surveillance par satellite de la qualité de l'eau dans les masses d'eau douce intérieures. En outre, les programmes de libre accès à la plupart des images satellites d'OT, tels que Landsat et Sentinel, facilitent encore la recherche et les applications, contribuant ainsi à une meilleure compréhension et connaissance des impacts du changement climatique et des activités humaines sur les ressources en eau. L'utilisation de satellites et de drones d'OT permet par ailleurs de surveiller la qualité de l'eau et les prélèvements d'eau dans les zones dépourvues d'infrastructures ou inaccessibles, notamment dans les pays en développement.

Le contexte épidémiologique de la pandémie de COVID-19 en 2020 et les caractéristiques scientifiques inconnues du virus CoV-2 du SRAS ont entraîné le confinement de villes entières et l'isolement social de milliards de personnes, ainsi que la fermeture d'activités économiques vitales. La société civile a donc reconnu l'importance et la valeur de l'eau potable, de l'hygiène et de l'assainissement digne dans le cadre de la protection de la santé publique. Jamais auparavant le message sur l'importance d'un lavage fréquent et correct des mains pour prévenir l'infection par le virus de la COVID-19 n'a été autant relayé. Le programme WASH a mobilisé une attention toute particulière dans le but d'endiguer la propagation de la pandémie, en particulier parmi les populations plus vulnérables qui n'ont pas facilement accès à l'eau potable.

Face à ces défis, l'innovation technologique, la gestion des connaissances, la recherche avancée et le développement des capacités vont générer de nouveaux outils et de nouvelles approches et, chose tout aussi importante, accélérer la mise en œuvre des connaissances et des technologies existantes dans tous les pays et régions (UNESCO/ONU-Eau, 2020).

Recommandations

- 1.** L'eau potable est au cœur de toute politique de santé publique et fait partie intégrante du développement durable. Les gouvernements et les décideurs politiques doivent prendre des mesures urgentes pour accélérer la réalisation de l'ODD 6 et résoudre le problème de l'inaccessibilité à l'eau potable qui crée un cercle vicieux de pauvreté, d'inégalité, de pénurie alimentaire et de migration forcée, particulièrement dramatique dans les pays moins développés.
- 2.** Il faut répondre aux défis mondiaux anticipés en matière d'eau liés aux conséquences de la pollution croissante de l'eau et des changements climatiques, tout en bénéficiant des progrès de la science, de la technologie et de l'innovation dans des domaines comme les modèles hydro-environnementaux, les systèmes d'aide à la décision, la microélectronique, la nanotechnologie, la chimie fine, la biotechnologie et les technologies de l'information.
- 3.** La portée sociale et environnementale de l'eau potable et la dimension globale du Programme de développement durable à l'horizon 2030 exigent une approche intégrée et systématique pour traiter les spécificités de chacun des 17 ODD dont la mise en œuvre nécessite une analyse interdisciplinaire intensive et une expertise multisectorielle.

Références

- Chadwick, E. 1842. *Report on the Sanitary Condition of the Labouring Population of Great Britain*. Éd. avec introduction par M.W. Flinn. Édimbourg, Edinburgh University Press, 1965.
- OMS. 2019. *Safer Water, Better Health: Costs, Benefits and Sustainability of Interventions to Protect and Promote Health*. Genève, Organisation mondiale de la Santé.
- Rose J.B. et Masago Y. 2007. A toast to our health: Our journey toward safe water. *Water Science and Technology: Water Supply*, vol. 7, n° 1, p. 41–48.
- Trevelyan, J. 2019. *30-Second Engineering*. T. Sancho chapter, p. 146–147. Brighton, Royaume-Uni, Ivy Press.
- UNESCO/ONU-Eau. 2020. *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2020 : Eau et changements climatiques*. Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture et ONU-Eau. Paris, Éditions UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000372985.locale=en>
- UNICEF/OMS. 2019. *Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000–2017: Special Focus on Inequalities*. Fonds des Nations Unies pour l'enfance et Organisation mondiale de la Santé. New York, UNICEF et OMS. <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/329370/9789241516235-eng.pdf?ua=1>
- Vieira, J.M.P. 2018. *Água e Saúde Pública [Eau et santé publique]*. Lisbonne, Edições Sílabo (en portugais.)

3.2.2. L'hydrologie au service des ODD

Anil Mishra¹⁵, Will Logan¹⁶, Yin Chen¹⁷, Toshio Koike¹⁸, Abou Amani et Claire Marine Hugon¹⁹

Résumé. La science de l'hydrologie fournit des connaissances et des informations pratiques pour répondre aux besoins sociétaux de l'humanité dans le cadre des flux, du transport et de la gestion de l'eau et, par conséquent, entretient des liens étroits avec l'application de l'ingénierie. Depuis 1930, le développement de la science de l'hydrologie en tant que domaine à part entière de la recherche scientifique (Horton, 1931) a coïncidé avec une accélération considérable du développement de l'infrastructure hydraulique au cours des quatre décennies qui ont suivi. En outre, l'évolution rapide du développement des infrastructures hydrauliques a déclenché des applications d'ingénierie dans le monde entier. Et c'est ainsi que l'hydrologie et l'ingénierie se sont développées essentiellement en tandem. Dans le présent document, le développement mutuellement intégré de l'hydrologie et de l'ingénierie en vue de répondre aux défis mondiaux, y compris la mise en œuvre des Objectifs de développement durable (ODD), est présenté sous les perspectives du Programme hydrologique intergouvernemental (PHI) de l'UNESCO.

Défis mondiaux en matière d'eau

La population mondiale devrait passer de 7,7 milliards d'habitants en 2017 à près de 10 milliards en 2050, et les deux tiers de cette population devraient vivre dans des zones urbaines (DESA, 2017). Cette croissance entraînera une augmentation similaire de la demande en eau dans les secteurs tels que l'agriculture, l'énergie et l'industrie, et se manifestera par des applications de l'ingénierie visant le développement d'infrastructures liées à l'eau. Outre la

croissance démographique et le développement économique, les changements climatiques représentent également un facteur important de la sécurité de l'eau. L'adaptation aux changements climatiques et l'atténuation des effets de ces changements par la gestion de l'eau sont donc essentielles au développement durable et nécessaires pour mettre en œuvre les Objectifs de développement durable à l'horizon 2030, l'Accord de Paris et le Cadre de Sendai pour la réduction des risques de catastrophes (UNESCO/ONU-Eau, 2020).

Outre l'approvisionnement en eau et l'assainissement, la gestion et la réduction de l'incertitude et des risques liés aux inondations, au transport et au dépôt de sédiments dus à l'érosion, et aux sécheresses sont également des défis majeurs au niveau mondial. Étant donné que ces domaines intègrent mutuellement l'hydrologie et l'ingénierie, des études de cas s'y rapportant sont présentées dans ce chapitre.

Comment l'hydrologie et l'ingénierie prennent en compte les ODD

L'eau est explicitement évoquée dans l'ODD 6 (eau propre et assainissement). De même les objectifs liés à la réduction de la pauvreté, à l'alimentation, à la santé, à l'égalité des sexes et à l'éducation, ainsi que les cibles relatives aux catastrophes liées à l'eau et à l'adaptation aux changements climatiques concernent également l'eau. Ainsi, le rôle initial de l'hydrologie dans la réalisation des objectifs relatifs à l'eau a évolué, passant d'une approche essentiellement technique à une approche intégrée impliquant les sciences naturelles, les sciences sociales et humaines et l'ingénierie. Les infrastructures techniques et naturelles doivent être combinées à des approches de gestion de l'eau impliquant l'engagement des parties prenantes et une adaptation climatique ascendante. Ces activités nécessitent la mobilisation de la coopération internationale pour la recherche, le renforcement de l'interface politique-science et le renforcement des capacités. L'UNESCO, par l'intermédiaire de ses différents secteurs de programme (éducation, sciences,

¹⁵ Division des sciences de l'eau, UNESCO.

¹⁶ Centre international de gestion intégrée des ressources en eau.

¹⁷ Centre international de formation et de recherche sur l'érosion et la sédimentation (IRTCES).

¹⁸ Centre international de gestion des risques associés à l'eau (ICHARM).

¹⁹ Division des sciences de l'eau, UNESCO.

culture, communication et information), est investie d'une mission unique pour examiner la relation qui unit les ODD liés à l'eau.

Le rôle unique de l'UNESCO dans l'hydrologie et la prise en compte des ODD

L'UNESCO a joué un rôle crucial dans ce développement en parrainant la Décennie hydrologique internationale (DHI 1965–74), qui a fourni un mécanisme permettant d'entreprendre une étude mondiale des ressources en eau disponibles pour les travaux d'ingénierie, notamment les aspects sociaux, la qualité de l'eau et l'utilisation des terres. La DHI et le Programme hydrologique intergouvernemental (PHI) qui l'a suivie avaient pour objectif de renforcer les bases scientifiques et technologiques de l'hydrologie par le développement et la formation sur les méthodes, techniques et directives d'une gestion durable de l'eau.

Le PHI est le seul programme intergouvernemental du système des Nations Unies consacré à la recherche sur l'eau et à la gestion de l'eau, ainsi qu'à l'éducation et au développement des capacités dans ce domaine. L'objectif principal de la huitième phase du PHI (2014-2021) intitulée « Sécurité de l'eau : Réponses aux défis locaux, régionaux et mondiaux », est de mobiliser la science au service de la sécurité de l'eau. Toutes les activités de cette phase sont au service des ODD. La neuvième phase du PHI (2022-2029) qui s'annonce reflétera des liens encore plus étroits pour la réalisation des ODD, de l'Accord de Paris et du Cadre de Sendai.

Les trois études de cas ci-dessous ont été réalisées par le PHI et les trois centres de catégorie II de l'UNESCO : ICHARM²⁰, IRTCES²¹ et ICiWARM²². Ces centres accueillent les secrétariats de l'Initiative internationale sur les inondations (IFI), de l'Initiative internationale relative à la sédimentation (ISI) et du Réseau mondial d'information sur l'eau et le développement dans les zones arides (G-WADI), et se consacrent à la gestion de l'eau et aux applications d'ingénierie basées sur les services hydrologiques (respectivement la lutte contre les inondations, le transport des sédiments et la sécheresse).

Lutte contre les inondations, exploitation des barrages et gestion de l'eau en Asie et en Afrique de l'Ouest

L'ICHARM a mis au point le modèle WEB-RRI (Water and Energy Budget-based Rainfall-Runoff-Inundation) pour analyser les phénomènes des risques liés à l'eau avec un haut niveau de précision. Ce modèle intègre le modèle Hydro-SiB2, capable de

calculer la dynamique du bilan hydrique et énergétique, et le modèle Rainfall-Runoff-Inundation (RRI), capable d'effectuer des calculs de ruissellement et d'inondation en 2D. L'utilisation de ce nouveau modèle, associé à des modèles atmosphériques, a permis d'évaluer non seulement l'impact des risques d'inondation, mais aussi celui des risques de sécheresse dus aux changements climatiques à venir. En appliquant un système d'optimisation intégré à la procédure d'exploitation actuelle des barrages hydroélectriques, l'ICHARM collabore avec les compagnies d'électricité pour réduire les décharges inefficaces des barrages, améliorer l'efficacité de la production d'électricité pendant une inondation et sécuriser la capacité de stockage d'un réservoir de barrage après une inondation.

Des systèmes de prévision des inondations en temps réel ont été développés pour la rivière Kalu au Sri Lanka et la rivière Pampang aux Philippines à l'aide du système d'intégration et d'analyse des données (DIAS), en collaboration avec l'ICHARM et l'Université de Tokyo, et ils ont commencé à fournir des informations sur la prévision des inondations à des organisations connexes dans les deux pays. De même, dans le cadre d'un projet de la Banque asiatique de développement (BASD) sur l'évaluation de l'impact des changements climatiques, l'ICHARM a appliqué à trois villes du Viêt Nam une série de méthodes de prévision tenant compte du facteur incertitude. Il s'agit de : Hue, Ha Giang and Vinh Yen. Dans cette étude, quatre modèles de circulation générale (MCG) ont été sélectionnés pour leur grande expressivité en ce qui concerne les facteurs météorologiques. L'incertitude provenant des MCG concernant les prévisions futures a été évaluée par l'application d'une réduction d'échelle statistique, tandis que des scénarios climatiques futurs ont été créés à l'aide d'une réduction d'échelle dynamique, et que l'évaluation des risques d'inondation a été réalisée à l'aide du modèle RRI.

En Afrique de l'Ouest, des inondations catastrophiques se produisent souvent dans les bassins du Niger et de la Volta, ce qui entraîne des décès et entrave le développement économique dans la région. Pour réduire les pertes en vies humaines, l'UNESCO a proposé de développer des systèmes de surveillance et de prévision des inondations pour ces bassins et leurs environs. Après avoir conclu un accord de partenariat avec l'UNESCO dans le cadre de la Plateforme sur les catastrophes liées à l'eau pour renforcer la résistance au climat en Afrique, l'ICHARM a mis au point un système d'alerte rapide aux inondations pour les bassins du Niger et de la Volta afin de contribuer à réduire les risques de catastrophes liées à l'eau. L'ICHARM a invité au Japon des ingénieurs de l'AGRHYMET, un institut spécialisé du Comité permanent inter-États de lutte contre la sécheresse dans le Sahel (CILSS), et l'Autorité du bassin de la Volta (VBA) et a, dans le même temps, dispensé une formation sur le système.

20 Site Web officiel du Centre international de gestion des risques associés à l'eau : <https://www.pwri.go.jp/icharm/>

21 Plus d'informations sur le Centre international de formation et de recherche sur l'érosion et la sédimentation (IRTCES) sont disponibles à l'adresse suivante : <https://uia.org/s/or/en/1100024285>

22 Site Web officiel du Centre international de gestion intégrée des ressources en eau : <https://iciwarm.info>

Application des services hydrologiques à la lutte contre les inondations et à la gestion des sédiments dans le cadre du projet des Trois Gorges sur le fleuve Yang Tsé, en Chine

Situé dans la partie moyenne du fleuve Yang Tsé, le projet des Trois gorges en Chine est l'un des projets hydrologiques les plus importants du monde. Depuis 2003, le projet des Trois gorges a permis d'obtenir des résultats globaux en matière de lutte contre les inondations, de navigation, de production d'énergie et de ressources en eau. Sa capacité annuelle moyenne de production d'énergie est de 84,88 milliards de kWh, soit environ 50 millions de tonnes de charbon. Le ruissellement annuel moyen et les charges sédimentaires du fleuve dans le site du barrage sont respectivement évalués à 451 milliards de m³ et 530 millions de tonnes. En ce qui concerne le projet, la capacité totale de stockage est de 39,3 milliards de m³ et celle pour la lutte contre les inondations de 22,15 milliards de m³. Les enregistrements hydrologiques à long terme et en temps réel sont utilisés pour déterminer ses modes de fonctionnement en matière de lutte contre les inondations et de gestion des sédiments.

Le projet maîtrise 96 % de l'eau qui s'écoule vers Jingjiang, la section du fleuve la plus dangereuse en période de crues, et plus des deux tiers de l'eau qui s'écoule vers Wuhan. La norme de contrôle des inondations de la section de Jingjiang est élevée une fois tous les cent ans grâce au stockage des eaux de crue, à la réduction du débit de pointe et à l'aplatissement de la pointe de crue. Entre 2003 et 2019, le projet des Trois Gorges a stocké un total de 153,3 milliards de m³ d'afflux d'eaux de crue et il joue un rôle indispensable dans l'atténuation globale des inondations et la réduction des niveaux d'inondation massive dans le bassin du Yang Tsé.

Durant l'été 2020, des inondations graves se sont produites dans ce bassin. Grâce à la régulation du Projet, le débit de pointe est passé de 70 000 m³/s à 40 000 m³/s et le niveau d'eau circulant le long du cours principal de la partie moyenne du Yang Tsé a baissé de 0,45 à 2,55 m. Selon l'Académie chinoise d'ingénierie, les bénéfices annuels du projet des Trois Gorges relatifs à la prévention des inondations s'élèvent à eux seuls à 8,8 milliards de yuans.

Le projet des Trois Gorges fonctionne en modes « stockage d'eau claire et expulsion de la boue ». Pendant la saison des crues, le niveau d'eau est maintenu bas de manière à ce que les grandes concentrations de sédiments soient transportées à travers le réservoir et évacuées en aval ; au cours du reste de l'année, le réservoir fonctionne à un niveau d'eau de 175 mètres. De 2003 à 2019, la quantité de sédimentation

dans le réservoir était de 1,8 milliard de tonnes et le taux de distribution de sédiments du réservoir de 24 %. Selon les prévisions actuelles en matière d'apport de sédiments, la période d'équilibre de la sédimentation du réservoir peut être prolongée de cent ans à plus de trois cents ans.

Des ateliers internationaux de formation ont été organisés par le Centre international de formation et de recherche sur l'érosion et la sédimentation (IRTCES) en vue de développer la conception pratique et les stratégies de gestion qui faciliteront le développement durable des énergies hydroélectriques et des barrages grâce à la gestion de la sédimentation du réservoir. Par exemple, le « Cours de formation international sur la gestion intégrée des sédiments » et l'« International Workshop on RESCON 2 and Numerical Modelling for Assessment of Sediment Management Alternatives » ont eu lieu respectivement à Beijing en 2018 et à Chengdu en 2019.

Sécheresse, pénurie d'eau et gestion de l'eau : Californie, États-Unis

La Californie du Sud est un important producteur agricole, un grand centre manufacturier et une région abritant 23 millions de personnes. Avec une pluviométrie annuelle moyenne de seulement 375 mm/an, l'eau doit être importée depuis d'autres régions la plupart des années. En effet, en moyenne plus de la moitié de l'eau de la Californie du Sud provient des aqueducs de la Californie du Nord et du fleuve Colorado, qui traverse plusieurs États. Les infrastructures techniques comprennent les pipelines qui acheminent cette eau, les barrages qui la stockent et protègent les grandes villes, les usines de distribution qui fournissent l'eau potable, les installations qui traitent et distribuent les eaux usées pour une réutilisation, et les puits d'injection qui forment une barrière hydraulique pour empêcher l'intrusion d'eau de mer.

Au mieux, la tâche de la communauté des ingénieurs spécialistes des ressources en eau est difficile ; pendant les années de sécheresse, chaque goutte d'eau compte. Certains des compromis les plus difficiles consistent à trouver un équilibre entre la gestion des risques d'inondation et l'approvisionnement en eau pendant les sécheresses. La pire sécheresse du millénaire dont a souffert la Californie de 2011 à 2017 a mis une pression forte sur les responsables de la gestion de l'eau. Cependant, les hydrologues de nombreuses sous-disciplines ont contribué à atténuer une partie de cette pression. Tout d'abord, les hydrométéorologues ont estimé le volume et la répartition des rares précipitations à l'aide de satellites (y compris des systèmes développés conjointement par l'UNESCO), d'un radar Doppler au sol et de pluviomètres. Ensuite, à l'aide de relevés de neige et d'images satellitaires et aériennes, les hydrologues de la neige ont mesuré l'équivalent en eau de fonte de la couverture neigeuse dans des

L'ingénierie au service du développement durable

montagnes. Puis, les hydrologues des surfaces terrestres et des eaux de surface ont traduit l'eau de pluie et le ruissellement des eaux de fonte en apports aux réservoirs. Enfin, les hydrologues des eaux souterraines ont analysé le rendement sûr des systèmes aquifères de l'État, vers lesquels de nombreux irrigateurs se sont tournés lorsque les sources d'eau de surface se sont asséchées, ainsi que la capacité de recharger les aquifères. Toutes ces études ont permis d'empêcher une catastrophe majeure.

Néanmoins, les hydrologues peuvent en faire davantage pour améliorer la gestion des infrastructures techniques lors de la prochaine sécheresse. Les expériences de terrain sont en cours pour tester la stratégie de gestion Forecast-Informed Reservoir Operations (FIRO) [opérations de réservoir basées sur les prévisions]. Les données provenant de la surveillance des bassins versants, ainsi que les prévisions météorologiques et hydrologiques, seraient utilisées pour aider à gérer les évacuations d'une manière reflétant à la fois les conditions actuelles et prévues. Au barrage du Prado, en Californie du Sud, par exemple, la stratégie FIRO pourrait être utilisée, lors des inévitables sécheresses futures, pour améliorer la capture des rares eaux de pluie en vue de recharger les aquifères, tout en maintenant des risques d'inondation acceptables pour les régions fortement urbanisées en aval.

La voie à suivre

Ni l'ingénierie ni l'hydrologie ne sont statiques. Ces deux domaines ont subi l'impact de la technologie et des besoins sociétaux (Sivapalan et Blöschl, 2017) ; une tendance qui devrait se confirmer à l'avenir (Blöschl *et al.*, 2019). Pour répondre à ces facteurs, l'Association internationale des sciences hydrologiques (AISH) a défini vingt-trois « problèmes non résolus en hydrologie » (Blöschl *et al.*, 2019). Des études récentes mettent également en évidence les progrès des sciences et de l'innovation hydrologiques et de l'ingénierie en matière de gestion de l'eau, ainsi que les solutions permettant d'améliorer cette relation, notamment en vue de contribuer à la mise en œuvre du Programme de développement durable à l'horizon 2030, de l'Accord de Paris et du Cadre de Sendai.

Malgré les nombreux progrès réalisés à ce jour dans le domaine de l'ingénierie et de l'hydrologie, des données intégrées complètes et des approches multidisciplinaires sont nécessaires pour fournir des solutions à la mise en œuvre des ODD et de ses objectifs liés à l'eau. L'étendue du mandat de l'UNESCO dans le domaine des sciences naturelles et sociales lui confère des atouts uniques pour relever ces défis. En mettant en œuvre des méthodes et des outils novateurs, multidisciplinaires et respectueux de l'environnement, tout en favorisant et en exploitant les avancées réalisées dans le domaine des sciences de l'eau, le programme hydrologique intergouvernemental et la famille de l'eau de l'UNESCO agissent au niveau du lien entre science et politique pour aider à relever les actuels défis mondiaux liés à l'eau.

Recommandations

1. Des recherches récentes doivent mettre en évidence les progrès des sciences et de l'innovation hydrologiques et de l'ingénierie en matière de gestion de l'eau, ainsi que les solutions permettant d'améliorer cette relation, notamment en vue de contribuer à la mise en œuvre du Programme de développement durable à l'horizon 2030, de l'Accord de Paris et du Cadre de Sendai.
2. Les infrastructures techniques et naturelles doivent être combinées à des approches de gestion de l'eau impliquant l'engagement des parties prenantes et une adaptation climatique ascendante.
3. Les ingénieurs doivent être formés aux récents progrès de l'hydrologie, qui vont de pair avec des facteurs externes tels que la technologie et les besoins sociétaux, afin de développer des approches pour la mise en œuvre des ODD et d'autres objectifs liés à l'eau.

Références

- Blöschl, G. *et al.* 2019. Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH) – a community perspective. *Hydrological Sciences Journal*, vol. 64, n° 10, pp. 1141–1158.
- DESA. 2017. *World population prospects: Key findings and advance tables – the 2017 revision*. Document de travail n° ESA/P/WP/248 Département des affaires économiques et sociales, Division de la population. New York, Nations Unies. esa.un.org/unpd/wpp/Publications/Files/WPP2017_KeyFindings.pdf
- Horton, R.E. 1931. The field, scope, and status of the science of hydrology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, vol. 12, n° 1.
- Sivapalan, M. et Blöschl, G. 2017. The growth of hydrological understanding: Technologies, ideas, and societal needs shape the field. *Water Resources Research*, vol. 53, pp. 8137–8146.
- UNESCO/ONU-Eau. 2020. *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2020 : Water and climate change*. Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture. Paris, Éditions UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000372985.locale=en>



Darrel J. Danyluk²³

3.3

CHANGEMENTS CLIMATIQUES : UNE URGENCE CLIMATIQUE



Bernhard Steeh/Shutterstock.com

²³ Ancien président d'Ingénieurs Canada et ancien président du Comité pour l'ingénierie et l'environnement de la FMOI.

Résumé. Les changements climatiques, qui se manifestent à travers des changements dans les conditions atmosphériques et océaniques, imposeront des risques élevés et nouveaux à de nombreux systèmes naturels et humains, notamment à travers les changements dans la variabilité climatique et dans la fréquence et l'ampleur des événements climatiques extrêmes. Toutes les infrastructures ont été conçues et construites en respectant les codes et les normes en vigueur au moment de leur construction. Toutefois, ces codes et normes reposent sur l'hypothèse selon laquelle le climat est stationnaire, laquelle hypothèse est désormais remise en question par les changements climatiques (FMOI-CEE, 2010).

Un système échoue à cause de ses défaillances, celles-ci doivent être identifiées et atténuées

Le monde fait face à un avenir difficile. Les impacts des changements climatiques sont réels et il est crucial de surmonter cette crise ; la gravité de ces événements ne peut et ne doit pas être sous-estimée. La Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) et le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIECC) ont conclu que le monde connaît des changements climatiques qui exigent une réévaluation de la pertinence des critères en matière de climat actuellement utilisés dans la conception de l'ensemble des infrastructures. Ces évaluations sont importantes pour déterminer la vulnérabilité des infrastructures face aux impacts du climat et pour la mise en œuvre des mesures d'adaptation qui visent à atténuer leurs risques et effets. C'est cette menace pour les infrastructures existantes qui constitue l'urgence climatique. L'eau, les transports, l'électricité, les communications et les infrastructures construites sont tous menacés, et la défaillance d'une infrastructure peut avoir de graves répercussions sur nos économies, notre sécurité et notre mode de vie. L'ampleur de la menace des changements climatiques pour les infrastructures du monde est grande. Les infrastructures existantes sont le pilier du monde développé, car elles fournissent aux populations des ressources nécessaires pour une vie saine et sécurisée. Il est donc important d'identifier ces éléments de vulnérabilité et de lutter contre les risques climatiques croissants qui peuvent mettre en danger cet équilibre.

Les catastrophes liées au climat qui affectent les infrastructures ne peuvent être atténuées que si les améliorations systémiques pour la réalisation des infrastructures sont mises en œuvre. Les dirigeants, les citoyens, les administrations et les autres entités doivent correctement jouer leur rôle, en insistant sur l'importance de

la sensibilisation et de l'éducation à la prévention des catastrophes afin d'adopter complètement une culture de prévention.

Les ingénieurs devront fournir de grands efforts pour comprendre, quantifier et s'adapter à ces changements afin de réduire les impacts météorologiques de plus en plus graves qui influent négativement sur la fourniture et la durabilité des systèmes d'infrastructures.

Déclaration de la FMOI sur l'urgence climatique : la réponse de la communauté mondiale des ingénieurs à l'urgence climatique

Les crises qui résultent des changements climatiques font partie des problèmes les plus graves de notre époque. Alors que les changements climatiques induits par l'homme sont un phénomène reconnu par la communauté scientifique et par la plupart des pays du monde, le monde est toujours en demande d'actions positives et collectives, et de leadership en matière de résistance au climat dans le but d'éviter un scénario habituel et les hausses d'émissions. Les communautés des ingénieurs et l'ingénierie ont un rôle à jouer dans la mise en lumière de ces questions et la proposition de solutions pragmatiques et réalisables pour aborder à la fois l'atténuation et l'adaptation aux changements climatiques. L'objectif premier des ingénieurs a toujours été centré sur la recherche du progrès et des solutions en vue de l'amélioration du bien-être sociétal. Les États membres, les organisations d'ingénieurs, les concepteurs, les constructeurs, les praticiens, les universités, les chercheurs et les parties prenantes doivent reconnaître l'urgence climatique comme une menace grave pour la pérennité de toute l'humanité.

La CCNUCC fournit une plateforme stable sur laquelle les ingénieurs peuvent plaider en faveur d'une nécessité de coopération en vue de la construction des infrastructures durables et résilientes en utilisant les technologies éprouvées et récentes, lesquelles sont essentielles pour atténuer les conséquences de la crise climatique et pour réaliser les économies neutres en carbone et la transition des industries. Au cours des réunions des Conférences des parties (COP), la profession d'ingénieur a été représentée par les membres du Comité sur l'ingénierie et l'environnement de la FMOI. Dans le cadre de la Conférence des Nations Unies sur les changements climatiques (COP 25) qui s'est tenue à Madrid en décembre 2019, la FMOI a exprimé sa profonde préoccupation sur la question de l'urgence climatique. La fédération a brièvement présenté sa position et son engagement à agir au plus vite grâce à la Déclaration sur l'urgence climatique de la FMOI qui a été signée par 27 établissements nationaux et régionaux d'ingénierie en 2020 (FMOI, 2019). Cette campagne de communication mondiale dont le but est de sensibiliser sur les conséquences immédiates et à long terme des changements climatiques entend appuyer les technologies innovantes qui permettront de relever ces défis et de construire des infrastructures et des communautés résilientes (encadré 1).

Encadré 1. Engagement de la FMOI et de la communauté mondiale des ingénieurs dans la lutte contre les changements climatiques

1. Poursuivre l'action de sensibilisation sur l'urgence climatique et le besoin urgent d'agir.
2. Étendre le partage des connaissances et la recherche afin de promouvoir et d'encourager le renforcement des capacités en matière d'atténuation et d'adaptation aux changements climatiques.
3. Œuvrer en faveur d'une communauté des ingénieurs où des membres divers et inclusifs peuvent travailler en collaboration pour élaborer des stratégies innovantes d'atténuation des changements climatiques.
4. Soutenir les pays en développement dans l'acquisition des connaissances en ingénierie en matière de meilleures pratiques d'atténuation et d'adaptation aux changements climatiques.
5. Utiliser l'influence mondiale et les relations de la FMOI pour rassembler les éléments démontrant l'impact des changements climatiques sur les femmes et les groupes désavantagés dans le monde.
6. Appliquer et développer plus de principes d'atténuation et d'adaptation au climat en tant que principales mesures pour la réussite de l'industrie de l'ingénierie.
7. Mettre à niveau les systèmes d'infrastructures construits et existants lorsque c'est la solution la plus efficace pour l'empreinte carbone tout au long de la vie et pour obtenir des résultats bénéfiques pour la société, sans exclusion.
8. Prendre en compte le coût du cycle de vie, la modélisation du cycle du carbone et l'évaluation post-construction, afin d'optimiser et de réduire le carbone incorporé, opérationnel et utilisateur.
9. Adopter des principes de conception plus régénératifs dans la pratique afin de fournir la conception d'ingénierie qui produit des systèmes d'infrastructures complets pour atteindre l'objectif de devenir des économies zéro net à l'horizon 2050.
10. Élever les niveaux actuels de collaboration entre la CCNUCC, la FMOI et ses membres, associés et partenaires, et tous les autres professionnels impliqués dans la conception et la fourniture des infrastructures complètes.
11. Travailler avec nos membres, associés et partenaires pour concrétiser cet engagement.

Éléments pour une amélioration systémique

Les normes existantes doivent être mises en œuvre pour préparer les ingénieurs aux changements nécessaires en vue de faire face aux impacts des changements climatiques sur les infrastructures construites dans le monde, car des infrastructures résistant au climat sont désormais nécessaires. Ces changements comprennent deux éléments et leurs possibles résultats, comme indiqué ci-dessous.

Élément n° 1 : Développer et mettre en place des outils d'ingénierie, des politiques et des pratiques pour l'évaluation des risques et l'adaptation aux changements climatiques des infrastructures civiles nouvelles et existantes.

Résultats de l'élément n° 1

- Le Protocole pour l'évaluation des risques climatiques sur les infrastructures (CVIIP, 2020) du Comité sur la vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques (CVIIP) a été élaboré et est utilisé par les professionnels de l'ingénierie dans le

monde. Cette méthodologie est reconnue et approuvée pour l'évaluation des risques climatiques et l'aide à la résilience des infrastructures.

La vulnérabilité de l'ingénierie/évaluation des risques sert de trait d'union entre les codes et les normes utilisés dans les conceptions d'ingénierie et les outils, tels que le CVIIP, utilisés jusqu'à la mise en place des nouvelles normes, garantissant ainsi la prise en compte des changements climatiques dans la conception et les opérations d'ingénierie, et dans la maintenance des infrastructures civiles. L'identification des éléments les plus vulnérables des infrastructures face aux impacts des changements climatiques permet de mettre sur pied des solutions d'ingénierie/opérations rentables.

Le Protocole est un processus structuré, formel et documenté conçu pour les ingénieurs, les urbanistes et les décideurs qui recommande des mesures permettant de résoudre les problèmes de vulnérabilités et de risques liés aux changements, notamment les paramètres de conception du climat et d'autres facteurs environnementaux résultant d'un événement climatique extrême. Les évaluations permettent de justifier les recommandations relatives à la conception, aux opérations et à la maintenance et fournissent des résultats documentés qui répondent aux obligations de diligence aux fins de l'assurance et de la responsabilité.

- Modèle de Code de pratique sur les principes d'adaptation aux changements climatiques pour les ingénieurs

Ce modèle de Code de pratique et guide d'interprétation (FMOI, 2013) définit le lien qui existe entre la pratique professionnelle et éthique en considérant l'ingénierie dans un contexte plus large de développement durable et d'intendance écologique. Il est recommandé pour les ingénieurs de s'informer continuellement sur l'évolution des conditions climatiques et de prendre en compte les éventuels impacts climatiques dans leur pratique professionnelle. Le Modèle de Code sert de guide d'examen des implications des changements climatiques afin que les ingénieurs puissent clairement enregistrer les résultats de ces considérations. Ses neuf principes constituent le champ d'application de la pratique professionnelle des ingénieurs dans l'élaboration des mesures d'adaptation aux changements climatiques, en particulier dans le cas des infrastructures et des bâtiments civils.

- Les codes, normes et lignes directrices mis à jour sont fondés sur la science et sont utilisés par les ingénieurs pour refléter l'évolution des conditions climatiques.

Les organismes nationaux et internationaux ont comblé les lacunes des codes, normes et lignes directrices existants, qui reflètent les critères des changements climatiques. Par exemple, le Guide ISO 84:2020 fournit des lignes directrices pour la prise en compte des changements climatiques dans les normes (ISO, 2020) afin que les développeurs de normes puissent considérer

L'ingénierie au service du développement durable

l'adaptation aux changements climatiques (ACC) et l'atténuation des effets des changements climatiques (CCM) dans leur travail de normalisation. Les considérations relatives à l'ACC visent à contribuer à une préparation plus accrue et à la réduction des catastrophes, ainsi qu'à une influence sur la résilience des organisations et de leurs technologies, activités ou produits.

Encadré 2. Les neuf principes sont résumés en trois catégories

1. Jugement professionnel

Principe n° 1 : Intégrer l'adaptation dans la pratique

Principe n° 2 : Examiner l'adéquation des normes actuelles

Principe n° 3 : Faire preuve de jugement professionnel

2. Intégrer l'information climatique

Principe n° 4 : Interpréter l'information climatique

Principe n° 5 : Travailler avec les spécialistes et les parties prenantes

Principe n° 6 : Adopter un langage efficace

3. Guide des pratiques

Principe n° 7 : Planifier une durée de vie

Principe n° 8 : Utiliser l'évaluation des risques pour l'incertitude

Principe n° 9 : Surveiller les responsabilités juridiques

Élément n° 2 : Acquérir la connaissance, l'expérience et les techniques appropriées permettant de renforcer les capacités techniques des ingénieurs pour adapter les infrastructures civiles aux changements climatiques, notamment dans les pays en développement et les pays les moins avancés.

Résultats de l'élément n° 2

- Ateliers de formation sur le Protocole d'ingénierie

Les ateliers sur la théorie et l'application des approches relatives à la gestion des risques et sur le Protocole CVIIP pour l'évaluation des risques climatiques sur les infrastructures sont ouverts aux ingénieurs et à d'autres professionnels. L'atelier comprend des présentations sur les principes de l'évaluation des risques et des exemples d'études de cas.

- Études de cas de l'évaluation de la vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures individuelles

Une fois achevées, les conclusions des évaluations de la vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures fournissent des informations précieuses sur leurs types d'infrastructures respectifs, tels que les systèmes d'approvisionnement en eau et d'évacuation des eaux usées, les ponts, les barrages, les aéroports, les ports, les autoroutes, les réseaux de transport et de distribution d'électricité et les bâtiments, y compris les hôpitaux.

Les exemples d'études de cas dans les pays en développement portent sur une évaluation des impacts futurs du climat sur les vannes d'écluse, avant leur construction, sur le fleuve Mekong, en Asie, l'évaluation d'un port et d'une ligne de transport d'énergie en Amérique du Sud, l'élaboration d'une approche du cadre pratique dans le bassin du Nil en Afrique et l'évaluation des ponts, de l'eau et des eaux usées en Amérique centrale.

- L'ingénierie et l'évaluation des risques climatiques jouent un rôle important dans les Plans nationaux d'adaptation (PNA). Un projet du GIZ, intitulé « Enhancing climate services for infrastructure investment (CSI) »²⁴ en a fourni une étude de cas.

Il est possible de combiner l'ingénierie, les services climatiques et la politique dans le but d'élargir le champ des mesures d'adaptation et, de ce fait, inclure les gouvernements, les régulateurs, les climatologues, les ingénieurs, les propriétaires d'infrastructures et d'autres praticiens dans cet effort de collaboration.

Le projet CSI a contribué au traitement des données climatiques et a montré comment les produits d'observation pour l'étude du climat et les services consultatifs peuvent être mis en place pour la planification des infrastructures, par exemple grâce aux évaluations des risques climatiques (GIZ, 2017). Une attention particulière a été accordée à une meilleure coopération entre les fournisseurs de données climatiques et leurs analystes, les décideurs, les urbanistes et les ingénieurs dans le secteur des infrastructures. Au cours de ce processus, des produits d'observation pour l'étude du climat adaptés ont été conçus pour réaliser une analyse des risques techniques des infrastructures sélectionnées.

La méthodologie de cette analyse est basée sur le protocole du CVIIP qui définit comment les objets d'infrastructure et leurs procédures opérationnelles sont affectés par divers facteurs climatiques, et elle constitue la base pour la sélection des mesures d'adaptation importantes. L'expérience tirée des évaluations des risques permet de prendre en compte les changements climatiques dans les méthodes et les lignes directrices existantes de planification des infrastructures spécifiques à chaque pays.

Toutes les activités peuvent être intégrées au PNA et aux Contributions déterminées au niveau national (CDN) pour promouvoir leur développement et leur mise en œuvre.

L'Analyse de décision fondée sur les risques climatiques (CRIDA) a été lancée pour intégrer l'incertitude des changements climatiques à l'identification (basée sur l'écosystème) des stratégies d'adaptation et pour favoriser des procédures flexibles de prise de décision (UNESCO, 2018).

24 Pour plus d'informations sur le projet CSI product landscape, aller à l'adresse : http://climate-resilient-infrastructure.com/wp-content/uploads/2020/08/CIS_GIZ_product_landscape_8.pdf

Encadré 3. Principes CRIDA

1. Identifier les problèmes et les opportunités liés aux changements futurs incertains.
2. Faire l'inventaire et la prévision des conditions qui conduisent à l'échec chronique.
3. Formuler des plans alternatifs solides ou ajustables. Sur la base des évaluations précédentes et de l'utilisation de la science pour évaluer la plausibilité, quatre stratégies distinctes conditionnent la formulation du plan de collaboration :
 - i. Le guide de planification et les marges de sécurité standard sont suffisants. Aucun changement n'est requis dans les procédures actuelles.
 - ii. L'élaboration des plans visant à réduire petit à petit le stress à venir qui nécessitent des alternatives plus solides selon l'ampleur.
 - iii. Des sources de preuves contradictoires, l'absence de consensus sur les preuves et/ou une faible aversion au risque des parties prenantes soutiennent que l'échec chronique est plausible. Une recommandation est faite en faveur d'une stratégie de collaboration visant à élaborer des plans « gagnant-gagnant » avec des options d'adaptabilité (c'est-à-dire, garantir que les alternatives futures, qui ne sont pas prises aujourd'hui, sont encore possibles demain).
 - iv. Les raisons de s'inquiéter sont suffisantes pour agir, mais les sources de preuves contradictoires, l'absence de consensus sur les preuves entraînent des désaccords sur la valeur d'un premier investissement. Une stratégie visant à élaborer des alternatives initiales solides et acceptables ainsi que des options supplémentaires pour l'avenir est recommandée.
4. Évaluer conjointement la solidité et l'adaptabilité. Dans le cadre du processus de CRIDA, l'utilisation du domaine de la vulnérabilité permet à toutes les parties de comprendre les événements futurs qui pourraient nuire à un projet.
5. Comparer la solidité ou l'adaptabilité des plans alternatifs.
6. Sélection d'un plan de solidité ou d'adaptabilité.

Recommandations

1. Les pays peuvent identifier, comprendre et gérer les risques liés aux changements climatiques en donnant la priorité aux mesures et aux plans d'adaptation, notamment en mettant en œuvre des procédures opérationnelles et de maintenance qui prolongent la durée de vie des infrastructures qui :
 - i) présentent un risque critique de défaillance ; ii) ont des exigences élevées en matière de service ; iii) arrivent à la fin de leur cycle de vie ; ou iv) dépassent le niveau de tolérance au risque et nécessitent des investissements importants pour leur rénovation ou leur remplacement.
2. Les acteurs intersectoriels nationaux et internationaux des gouvernements, de l'industrie, des universités, de la société civile et des médias doivent travailler conjointement pour surmonter cette crise climatique.
3. Les équipes qui conçoivent, gèrent et exploitent déjà les infrastructures fournissent les ressources humaines essentielles permettant d'identifier les défis climatiques et de mettre en œuvre des mesures d'adaptation ou correctives.
4. La mise à jour des codes, des normes et des lignes directrices nationaux, l'amélioration des services climatiques nationaux, le développement d'outils d'ingénierie et de planification pour normaliser les approches de l'évaluation des risques climatiques et l'utilisation d'équipes formées de plusieurs acteurs constituent la voie à suivre par les sociétés pour faire face aux risques des changements climatiques sur les infrastructures existantes et futures.
5. Une attention particulière doit être accordée aux pays vulnérables en développement afin de renforcer leurs capacités à fournir des infrastructures résistant au climat en actualisant leurs codes, normes et lignes directrices nationaux et en améliorant les capacités de leurs services climatiques, de leur ingénierie et de leurs capacités de prestation de service.
6. Il faudrait prôner la coopération dans la recherche en ingénierie pour identifier et fournir des solutions innovantes, y compris des solutions basées sur la nature. La mobilisation de la capacité d'ingénierie mondiale en vue de la mise en œuvre des solutions à l'échelle mondiale est une étape importante dans la lutte contre la crise climatique.

Références

- CVIIP. 2020. Protocole d'ingénierie du Comité sur la vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques (CVIIP). <https://pievc.ca/protocol>
- FMOI. 2010. *2009–10 Progress Report on WFEO Action Pledge. Adaptation of Sustainable Civil Infrastructure to Climate Change Impacts*. Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs. https://www.wfeo.org/wp-content/uploads/stc-environment/NWP-WFEO_action_pledge_update_april__2010_logo_FINAL.31144.pdf
- FMOI. 2013. *WFEO Model Code of Practice for Sustainable Development and Environmental Stewardship – Interpretive Guide*. Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs. https://www.wfeo.org/wp-content/uploads/code-of-practice/WFEOModelCodePractice_SusDevEnvStewardship_Interpretive_Guide_Publication_Draft_en_oct_2013.pdf
- FMOI. 2019. *Déclaration de la FMOI sur l'urgence climatique*. Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs. http://www.wfeo.org/wp-content/uploads/declarations/FMOI_Declaration_sur_lurgence_climatique.pdf
- FMOI-CEE Comité sur l'ingénierie et l'environnement de la Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs. 2010. WFEO-CEE Newsletter 2009-2015. Comité sur l'ingénierie et l'environnement de la Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs https://www.wfeo.org/wp-content/uploads/stc-environment/All_WFEO-CEE_Newsletters.pdf
- GIZ. 2017. Making use of climate information for infrastructure planning. Project description. Die Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH. <https://www.giz.de/en/worldwide/57471.html>
- ISO. 2020. *ISO GUIDE 84:2020 Lignes directrices pour la prise en compte des changements climatiques dans les normes*. Organisation internationale de normalisation. <https://www.iso.org/fr/standard/72496.html>
- UNESCO. 2018. *Climate Risk Informed Decision Analysis (CRIDA): Collaborative Water Resources Planning for an Uncertain Future*. Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture et Centre international pour la gestion intégrée des ressources en eau. Paris, Éditions UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000265895>

Soichiro Yasukawa²⁵ and Sérgio Esperancinha²⁶

3.4 L'INGÉNIERIE : UN OUTIL INDISPENSABLE À LA RÉDUCTION DES RISQUES DE CATASTROPHES



Kurniawan Rizqi/Shutterstock.com

25 Section des sciences de la Terre et de la réduction des géorisques, Division des sciences écologiques et des sciences de la Terre, UNESCO.

26 Section des sciences de la Terre et de la réduction des géorisques, Division des sciences écologiques et des sciences de la Terre, UNESCO.

Résumé. Les progrès réalisés dans les domaines de l'ingénierie, des sciences et de la technologie appliquées à la réduction des risques de catastrophes permettent d'acquérir des connaissances sur les mécanismes des risques naturels, y compris sur les phénomènes par lesquels ils se transforment en catastrophes. En fin de compte, ce sont ces connaissances scientifiques qui fourniront des solutions pour atténuer la vulnérabilité des infrastructures et des sociétés. Ce chapitre résume les domaines d'intervention de l'UNESCO et la façon dont l'organisation utilise l'ingénierie dans ses activités de réduction des risques de catastrophes.

Introduction

De 2005 à 2015, les catastrophes naturelles ont causé des dommages évalués à 1400 milliards de dollars des États-Unis, ont fait 700 000 morts et ont touché 1,7 milliard de personnes dans le monde (UNDRR et CRED, 2018). Avec l'augmentation de la fréquence et de l'ampleur des catastrophes due aux changements climatiques, les pertes liées aux catastrophes naturelles sont également en hausse. Par exemple, on estime que d'ici à 2050, le nombre de personnes exposées aux cyclones dans les zones urbaines doublera pour atteindre 680 millions, et que celui des personnes risquant de subir un tremblement de terre majeur s'élèvera à environ 870 millions (Banque mondiale, 2010).

Les efforts mis en œuvre pour faire face aux catastrophes s'inscrivent dans le cadre du Programme de développement durable à l'horizon 2030, dont un grand nombre d'objectifs ne peuvent être atteints sans la réduction des risques de catastrophe (UNDRR, 2015). Les progrès réalisés dans les domaines de l'ingénierie, des sciences et de la technologie appliqués à la réduction des risques de catastrophes permettent d'acquérir des connaissances sur les mécanismes des risques naturels, y compris sur les phénomènes par lesquels ils se transforment en catastrophes. En fin de compte, ce sont ces connaissances scientifiques qui fourniront des solutions pour atténuer la vulnérabilité des infrastructures et des sociétés.

L'UNESCO aide les pays à renforcer leurs capacités de gestion des catastrophes et des risques climatiques, et apporte un soutien aux États membres, en particulier dans les domaines suivants : i) les systèmes d'alerte rapide ; ii) la sécurité des infrastructures essentielles ; iii) la prévention des risques pour les sites désignés par l'UNESCO ; iv) l'utilisation de la science,

de la technologie et de l'innovation, y compris de l'intelligence artificielle et des mégadonnées ; v) l'environnement bâti ; vi) la gouvernance des risques ; vii) les solutions fondées sur la nature ; et viii) les interventions après les catastrophes. L'ingénierie joue un rôle crucial dans le traitement de tous les aspects des interventions de l'UNESCO en matière de réduction des risques de catastrophes²⁷. Les sections suivantes fournissent quelques exemples de pratiques consistant à utiliser l'ingénierie pour la réduction des risques de catastrophes.

Systèmes d'alerte rapide

Les travaux de l'UNESCO portent sur divers risques, notamment les tsunamis, les tremblements de terre, les inondations, la sécheresse et les glissements de terrain.

Les systèmes d'alerte rapide aux tsunamis reposent sur des réseaux d'observation constitués de sismomètres et de stations de mesure du niveau de la mer, qui envoient des données en temps réel aux centres nationaux et régionaux d'alerte aux tsunamis. Sur la base de ces observations, les centres d'alerte aux tsunamis peuvent confirmer ou lever une veille ou une alerte aux tsunamis. Il est essentiel que les communautés à risque connaissent les actions à entreprendre en cas de danger imminent. L'UNESCO joue un rôle clé dans la réduction des risques de tsunamis au niveau mondial. La réduction des risques de tsunamis nécessite diverses formes d'ingénierie, notamment l'ingénierie des sols, l'ingénierie côtière et l'ingénierie du comportement, tant pour la prévision que pour des solutions telles que la planification des évacuations. Quatre groupes intergouvernementaux de coordination (GIC) correspondant aux régions du Pacifique, des Caraïbes, de l'océan Indien et de la Méditerranée ont été créés pour répondre à des besoins régionaux particuliers²⁸.

Frappée par un tsunami le 7 mai 1842, Fort-Liberté, la capitale du département du nord-est d'Haïti, a été classée zone à risque probable de tsunamis futurs. Des panneaux d'alerte ont été installés et du matériel de préparation a été distribué avec l'aide de l'UNESCO. Désormais, la ville dispose de procédures opérationnelles en cas de tsunami, et 50 points focaux locaux et nationaux ont été formés à la réception et à la diffusion des alertes. Des efforts importants ont été réalisés pour renforcer les capacités d'observation sismique et de modélisation des tsunamis dans tout le pays.

Éducation et sécurité des écoles

L'UNESCO promeut une méthode d'évaluation de la sécurité des écoles à risques multiples, connue sous le nom de VISUS (inspection visuelle pour la définition de stratégies de renforcement

27 Plus d'informations sur les actions de l'UNESCO en matière de réduction des risques de catastrophes sont disponibles à l'adresse suivante : www.unesco.org/new/en/natural-sciences/special-themes/disaster-risk-reduction

28 Plus d'informations sur les travaux de l'unité de réduction des risques de tsunamis sont disponibles à l'adresse suivante : www.ioc-tsunami.org

de la sécurité), qui repose sur l'utilisation d'inspections visuelles pour évaluer les risques pertinents susceptibles d'affecter les écoles, et sur l'application d'algorithmes prédéfinis reproduisant le raisonnement des experts pour porter des jugements. Cette méthode permet également d'évaluer les ressources disponibles pour une application effective des interventions nécessaires au renforcement de la sécurité. L'évaluation est basée sur l'application de l'ingénierie structurelle à des bâtiments précédemment endommagés par des catastrophes naturelles.

La méthode VISUS, qui intègre une forte composante de renforcement des capacités des décideurs, du personnel technique et des universités, a été testée avec succès dans sept pays : Italie (2010), Salvador (2013), République démocratique populaire lao (2015), Indonésie (2015–2018), Pérou (2016), Haïti (2017) et Mozambique (2017). Au total, la sécurité de plus de 500 000 étudiants et personnels enseignants a été évaluée (UNESCO et Université d'Udine, 2019).

Réduction des risques de catastrophes sur les sites désignés par l'UNESCO

Le patrimoine culturel joue un rôle considérable dans le développement économique et social d'un pays et constitue un atout pour la résilience et le redressement après une catastrophe.

Le monticule de Swayambhu, qui constitue une partie du site de la vallée de Katmandou inscrit au patrimoine mondial de l'UNESCO, a subi plusieurs glissements de terrain depuis les années 1970. Tous les deux ou trois ans, la pente de la colline subit des coulées de débris, des affaissements et des glissements de terrain dus au fluage de la masse de sol. Ces événements menacent l'intégrité du site religieux de Swayambhu, sur lequel est situé le plus vieux monument bouddhiste (un stupa) de la vallée. Grâce aux techniques d'ingénierie des sols, l'UNESCO a réalisé une étude géologique pour analyser le sol de cette zone et fournir des informations essentielles à la conception d'une solution d'ingénierie permettant de stabiliser la pente et de recommander la création d'infrastructures futures dans la zone.

Science, technologie et innovation au service de la résilience

La science, la technologie et l'ingénierie aident à recenser et expliquer les risques et à proposer des solutions pertinentes.

Parmi les formes de technologie les plus avancées, on distingue l'intelligence artificielle, tandis que les solutions les moins technologiques comprennent la science civile, la recherche participative et les connaissances

indigènes locales. Toutes les données rassemblées par l'UNESCO sont mises à la disposition du public.

D'après le rapport *Making Every Drop Count: An Agenda for Water Action*, les catastrophes liées à l'eau représentent 90 % des 1 000 catastrophes les plus graves s'étant produites depuis 1990. (DESA, 2018). L'UNESCO s'attelle à promouvoir la résilience des États membres dans la prise en charge des extrêmes hydrologiques tels que les inondations et les sécheresses, et à renforcer leurs capacités à évaluer et superviser les changements affectant la neige et les glaciers, qui constituent un indicateur singulier et clé de réchauffement et de changements climatiques.

L'UNESCO a mis au point divers exemples de données, outils, méthodes et systèmes de partage des connaissances pour appuyer les États membres dans leurs mesures de renforcement de capacités et de résilience, lesquels sont décrits au chapitre 3.2 : « Ingénierie des ressources en eau pour le développement durable ». Dans le cadre de ces initiatives, par exemple, un Atlas de la sécheresse en Amérique latine et aux Caraïbes a été produit en 2019, tandis qu'un Atlas de la sécheresse en Afrique est en cours d'élaboration grâce à des techniques telles que l'ingénierie hydraulique, des fleuves, de l'environnement et des sols.

L'environnement bâti

Les tremblements de terre font partie des catastrophes naturelles les plus mortelles, avec plus de 80 % de victimes causées par l'effondrement des bâtiments.

L'UNESCO aide ses États membres à obtenir des bâtiments et à mieux reconstruire grâce à l'amélioration des codes du bâtiment et des politiques de construction. L'UNESCO abrite également un Secrétariat de la Plateforme internationale pour la réduction des catastrophes sismiques, un groupe composé de centres d'excellence d'instituts nationaux ou d'universités de 11 pays exposés à des tremblements de terre, et qui mène des recherches actives dans le domaine de la sismologie, du génie sismique et du génie structurel. Les membres de cette Plateforme élaborent des directives en matière d'ingénierie et abordent les questions de politique générale pertinentes (UNESCO, 2014 ; 2016).

Gouvernance des risques et résilience sociale

L'UNESCO promeut l'engagement de la société civile, en ciblant des groupes tels que les jeunes et les femmes, dans la planification et la mise en œuvre de la réduction des risques de catastrophe, au niveau tant de la communauté que des dirigeants.

L'UNESCO aide également les États membres à travailler main dans la main pour encourager les jeunes et les jeunes professionnels à contribuer à la réduction des risques de catastrophes à travers la science, l'ingénierie, la technologie et l'innovation. L'UNESCO

a lancé un programme intitulé Jeunes et jeunes professionnels de la science, de l'ingénierie, de la technologie et de l'innovation pour la réduction des risques de catastrophes (U-INSPIRE). Avec l'aide de l'UNESCO, les professionnels participant au programme U-INSPIRE venus d'Afghanistan, d'Inde, d'Indonésie, d'Asie centrale (Kazakhstan, Tadjikistan et Ouzbékistan), de Malaisie, du Népal, du Pakistan et des Philippines ont pris part à un forum de deux jours, qui s'est tenu à Djakarta pendant le mois de septembre 2019, où ils sont formellement convenus de lancer l'Alliance des jeunes et des jeunes professionnels de la science, de l'ingénierie, de la technologie et de l'innovation de l'Asie et du Pacifique pour la réduction des risques de catastrophes et la lutte contre les changements climatiques. Les résultats de ce forum contribueront à l'élaboration d'une boîte à outils faisant ressortir les meilleurs exemples pratiques et fournissant des orientations sur la façon dont les jeunes et jeunes professionnels de la science, de l'ingénierie, de la technologie et de l'innovation engagés dans la réduction des risques de catastrophes peuvent enrichir les activités et cadres régionaux, nationaux et mondiaux de réduction des risques de catastrophes et prendre attache avec ces derniers (UNESCO, 2019).

Réduction des risques de catastrophes fondée sur les écosystèmes

L'UNESCO encourage la mise en œuvre de solutions fondées sur les écosystèmes et la nature, et de technologies visant à réduire les risques de catastrophes.

Elle travaille en collaboration étroite avec les experts internationaux pour intégrer son approche de planification du développement aux niveaux mondial, national et local. L'UNESCO participe activement aux activités en cours organisées par la Plateforme intergouvernementale science-politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES) et le Partenariat pour l'environnement et la réduction des risques de catastrophe (PERRC).

Par ailleurs, elle participe activement au projet OPERANDUM²⁹, qui vise à réduire les risques hydrométéorologiques par la co-conception, le co-développement, le déploiement, le test et la démonstration de solutions innovantes vertes et bleues/grises/hybrides, basées sur la nature. L'ingénierie joue un rôle crucial dans la mise au point de solutions potentielles, grâce à ses applications en matière environnementale, fluviale et côtière, et de sols.

Intervention après une catastrophe

Au lendemain d'une catastrophe, et en collaboration avec d'autres organismes des Nations Unies et partenaires internationaux, l'UNESCO aide les États membres à réagir afin d'évaluer les dommages et les pertes et de déterminer les besoins en matière de redressement et de reconstruction.

L'UNESCO a mis en place un système permettant d'envoyer des ingénieurs et des sismologues dans les pays frappés par un tremblement de terre afin de mener des enquêtes sur le terrain après le séisme et de tirer des enseignements pour la réduction des risques à l'avenir, grâce à l'expertise en matière de préparation et d'intervention internationales en cas d'urgence et de catastrophe (IPRED). L'analyse technique est appliquée aux bâtiments effondrés pour comprendre la cause de l'effondrement. Les résultats sont ensuite utilisés pour mettre en place de meilleurs codes et pratiques de construction. Des missions ont été envoyées à Kermanshah en Iran (2017), à Bohol aux Philippines (2014) et à Van en Turquie (2012) (UNESCO, s.d.).

Recommandations

1. Utiliser l'ingénierie et les sciences pour comprendre tous les aspects du risque de catastrophes que sont la vulnérabilité, la capacité, l'exposition des personnes et des biens, les caractéristiques des dangers et l'environnement.
2. Renforcer la coopération multipartite avec les ingénieurs, les autres disciplines techniques, les dirigeants, la société civile et le secteur privé pour renforcer la gouvernance des risques de catastrophes et améliorer la gestion des risques de catastrophes.
3. Par le biais de mesures structurelles et non structurelles, investir des fonds publics et privés dans des activités d'ingénierie visant la prévention et la réduction des risques de catastrophes afin de favoriser la résilience.
4. Utiliser l'ingénierie pour améliorer la préparation aux catastrophes afin de répondre efficacement aux prochaines catastrophes, et de « reconstruire en mieux » dans le cadre du redressement, de la réhabilitation et de la reconstruction.
5. À mesure que l'impact des catastrophes naturelles s'aggrave, touchant en particulier les plus vulnérables, notamment les pays d'Afrique, les petits États insulaires en développement (PEID), les femmes et les jeunes, veiller à ce que l'ingénierie soit considérée comme un outil important pour définir des mesures de préparation.

29 Plus d'informations sur le projet OPERANDUM sont disponibles à l'adresse suivante : <https://en.unesco.org/operandum> (en anglais).

Références

- Banque mondiale. 2010. *Natural hazards, UnNatural disasters: The economics of effective prevention*. Washington, D.C., Banque mondiale. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/2512>
- DESA. 2018. *Making Every Drop Count. An Agenda for Water Action. High Level Panel on Water*. Organisation des Nations Unies, Département des affaires économiques et sociales. https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/17825HLPW_Outcome.pdf
- UNDRR et CRED 2018. *Economic losses, poverty & disaster 1998-2017*. Bureau des Nations Unies pour la prévention des catastrophes et Centre de recherche sur l'épidémiologie des catastrophes. https://www.unisdr.org/files/61119_credeconomiclosses.pdf
- UNDRR. 2015. *Cadre de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe (2015-2030)*. Stratégie internationale des Nations Unies pour la prévention des catastrophes. Genève, UNDRR.
- UNESCO et Université d'Udine. 2019. *UNESCO guidelines for assessing learning facilities in the context of disaster risk reduction and climate change adaptation*. Volume 1-3 : Introduction to learning facilities assessment and to the VISUS methodology. Paris, Éditions UNESCO.
- UNESCO. 2014. *Guidelines for earthquake resistant non-engineered construction*. Paris, Éditions UNESCO. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000229059_eng
- UNESCO. 2016. *Towards resilient non-engineered construction: guide for risk-informed policy making*. Paris, Éditions UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000246077>
- UNESCO. 2019. The U-INSPIRE Alliance Network. *News*, 24 septembre. <https://en.unesco.org/news/youth-and-young-professionals-declare-regional-alliance-cooperation-science-engineering-0>
- UNESCO. s.d. IPRED UNESCO post-earthquake field investigation. www.unesco.org/new/en/natural-sciences/special-themes/disaster-risk-reduction/geohazard-risk-reduction/networking/ipred/post-earthquake-field-investigation
- Volume 1 : <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000371185.locale=en>
- Volume 2 : <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000371186?posInSet=2&queryId=3f2fa233-444b-4e87-a5c4-0277499c4be4>
- Volume 3 : <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000371188?posInSet=1&queryId=3f2fa233-444b-4e87-a5c4-0277499c4be4>

Jean-Eudes Moncomble³⁰

3.5 DÉVELOPPER DES SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES DURABLES ET RÉSILIENTS



© SweetScience, Inc

Solar panel in Africa

30 Secrétaire général du Conseil français de l'énergie (membre français du Conseil mondial de l'énergie) et président du Comité de la FMOI sur l'énergie.

Résumé. L'énergie est aujourd'hui au cœur de plusieurs réflexions et débats. Il est indéniable qu'elle a une importance capitale dans le développement économique et social auquel aspire toute la planète. L'énergie est intrinsèque aux transitions opérées dans nos sociétés et dans nos économies, en termes de modes de vie, d'alimentation ou de transport. Elle est également au cœur de la transformation des systèmes productifs ; une modernisation qui inclut le développement de la technologie numérique. La liste pourrait être longue, mais un consensus semble se dégager sur le fait que l'urgence climatique doit être considérée comme une priorité absolue compte tenu de ses conséquences dramatiques, dont certaines sont déjà visibles (FMOI, 2019).

L'énergie et les Objectifs de développement durable

Il s'agit donc d'évoluer vers des systèmes énergétiques durables compatibles avec les Objectifs de développement durable (ODD) des Nations Unies. L'ODD 7 sur l'énergie propre et d'un coût abordable relève deux défis majeurs : i) l'accès physique et économique à l'énergie, car entre 2,5 et 3 milliards de personnes dans le monde n'ont pas accès à des méthodes de cuisson convenables et environ 1 milliard n'ont pas accès à l'électricité ; et ii) la prévention des dommages environnementaux, car aucune forme d'énergie n'est produite, transportée ou utilisée sans avoir d'impact négatif sur notre planète et ses habitants. Cependant, une analyse uniquement axée sur l'ODD 7 serait très incomplète. Il semble donc essentiel de prendre en compte les autres ODD, car en réalité nombre d'entre eux dépendent fortement des décisions qui seront prises sur le développement des systèmes énergétiques. Voici quelques exemples des liens entre l'énergie et les ODD.

- Certaines solutions reposent sur l'utilisation des bioénergies, directement (bois pour la cuisine ou pour le chauffage) ou indirectement (biomasse transformée en combustibles). Il existe un lien évident avec l'ODD 2 sur la faim zéro, car il peut y avoir une concurrence dans l'utilisation des terres arables, tant pour les cultures vivrières que pour les sources d'énergie, ce qui peut entraîner des conflits.
- Dans certains pays, l'accès aux ressources vitales telles que le bois ou l'eau est difficile. Les femmes et les enfants sont souvent responsables de ces tâches et de l'approvisionnement domestique. Le temps qu'ils y consacrent empiète souvent

sur celui réservé aux activités scolaires des enfants ou aux activités professionnelles ou autres des femmes. Il existe donc une relation étroite entre l'énergie et l'ODD 4 sur l'éducation de qualité et l'ODD 5 sur l'égalité des sexes.

- L'eau et l'énergie sont étroitement liées et font l'objet de l'ODD 6 sur l'eau propre et l'assainissement. Presque toutes les technologies de production d'énergie nécessitent de l'eau. C'est évident pour l'énergie hydroélectrique, tout comme pour l'exploitation des hydrocarbures ou la production d'électricité dans presque toutes les technologies. Il est même essentiel de nettoyer les panneaux solaires avec de l'eau pour préserver leur efficacité. Certaines énergies secondaires utilisent de l'eau ; c'est le cas de la chaleur, mais aussi de l'hydrogène produit par électrolyse. Cependant, l'énergie est également nécessaire pour la production d'eau (pour les pompes par exemple), ainsi que pour le transport et le traitement de l'eau, avant et après son utilisation. Dans certains pays confrontés à la pénurie d'eau, des technologies de dessalement sont mises en œuvre et utilisent également de l'énergie.
- L'une des causes du réchauffement climatique est l'utilisation de combustibles fossiles. Cette situation met en évidence la relation étroite entre l'énergie et l'ODD 13 sur les mesures pour lutter contre les changements climatiques. La décarbonisation des systèmes énergétiques constitue manifestement un défi majeur pour les entreprises du secteur de l'énergie. Il est essentiel de promouvoir les énergies décarbonisées (renouvelables et nucléaires), ou les technologies qui rendent acceptable l'utilisation de combustibles fossiles, comme la capture et le stockage du carbone. Cependant, l'adaptation des systèmes énergétiques aux conséquences des changements climatiques est également un défi majeur qui touche à la fois la production d'énergie (par le biais du stress hydrique, qui se produira dans de nombreuses régions du monde) et la demande d'énergie (par le développement de certains usages, comme la climatisation).
- Il convient également de mentionner la relation entre l'énergie et l'ODD 16 sur la paix, la justice et les institutions efficaces. Il faut reconnaître que l'accès aux ressources énergétiques est la cause de nombreux conflits dans le monde ; le cas du pétrole est bien connu, mais il en existe d'autres. La gestion des débits de certains fleuves par des barrages a indirectement provoqué de véritables « tensions hydriques » en raison des conséquences sur la production d'électricité ou l'irrigation dans les pays voisins.

Systèmes d'énergie durable

Nous pouvons ainsi constater les précieuses contributions que peuvent apporter les systèmes énergétiques durables au nom de la prospérité et de la protection de la planète. Les

solutions énergétiques sont bien connues et nécessitent des choix éclairés pour produire l'énergie nécessaire (AIE, 2020 ; CME, 2016 ; GIEC, 2018a, b). Voici quelques exemples.

- Les énergies renouvelables, y compris l'hydroélectricité, sont perçues de manière favorable et comprennent un vaste ensemble de sources d'énergie aux avantages et inconvénients très divers, car toutes ont des impacts environnementaux, même s'ils sont parfois moins visibles que pour d'autres formes d'énergie. L'intégration de certaines sources d'énergie dans les réseaux électriques peut s'avérer difficile en raison de leur variabilité (par exemple, l'énergie éolienne ou photovoltaïque), certes, mais il en existe d'autres qui permettent de stabiliser le système (hydroélectricité). La plupart des énergies renouvelables ont une très grande empreinte et sont susceptibles de faire face à une opposition au niveau local, mais elles ont toutes l'avantage d'être pauvres en carbone.
- Comme toute énergie renouvelable, l'énergie nucléaire est quasiment exempte de carbone. Comme l'énergie hydroélectrique, elle est capable de produire d'énormes quantités d'électricité décarbonée, ce qui constitue une précieuse contribution dans la lutte contre les changements climatiques. Plusieurs organisations internationales, entreprises privées et experts trouvent en effet essentiel d'utiliser l'énergie nucléaire pour lutter contre les changements climatiques (GIEC, 2018a), et le principal défi est de lui redonner la place qu'elle mérite à travers l'information et les débats.
- Les énergies fossiles (charbon, pétrole et gaz) sont responsables de la plupart des émissions de CO₂, pourtant elles comptent encore pour 81 % du mix énergétique mondial. Si essayer d'éliminer rapidement et complètement les combustibles fossiles des sources d'énergie semble être un leurre, en particulier dans certains secteurs comme les transports ou dans certains pays, ils peuvent cependant contribuer à atteindre les objectifs souhaités lorsqu'ils sont associés à l'utilisation des technologies de capture et de stockage du carbone.

Quant à la demande d'énergie, la recherche du rendement énergétique mérite une analyse plus approfondie afin de bien comprendre les politiques et les mesures les plus efficaces. Certains potentiels de rendement énergétique sont faciles à exploiter à moindre coût, tandis que d'autres pourraient exiger de gros investissements avec des périodes d'amortissement longues ou encore des changements de comportement qui devraient prendre du temps puisqu'ils sont transmis par les canaux d'information et par l'éducation. En fin de compte, avec la pandémie de COVID-19 qui a amené les populations à changer leurs comportements et asséné un grand coup aux secteurs économique et professionnel, et il serait donc

intéressant d'observer la durabilité de ces changements compte tenu de la force des systèmes à retourner à la case départ. Les choix des priorités et des politiques varient selon les pays, au regard de leurs différences en matière de ressources naturelles, de géographie, de niveau de développement économique et social, et d'histoire et de culture. Chaque pays sera donc libre de choisir ses propres systèmes d'énergie durable.

Énergie et résilience

La lutte contre les changements climatiques ou l'importance de moderniser les économies restent toujours urgentes malgré la pandémie de COVID-19. Celle-ci souligne plutôt l'importance de la résilience dans un système énergétique, une aptitude qui doit être mise en lumière (WEC, 2020).

Voici des exemples de la résilience d'un système énergétique :

- La résilience aux risques liés à la santé, non seulement à la COVID-19, mais à ceux susceptibles de toucher les sociétés de manière plus considérable.
- La résilience à la pénurie de facteurs de production d'énergie, tels que les métaux rares, l'eau, la terre et les compétences.
- La résilience aux catastrophes naturelles, telles que les inondations, les sécheresses, les tremblements de terre ou les tsunamis.
- La résilience aux nouveaux risques très souvent liés à la modernisation des économies, tels que les cyberattaques ou les risques systémiques.

L'ingénieur servira donc finalement d'interface entre la durabilité et la résilience. Dans un contexte particulier de contraintes budgétaires fortes en particulier, liées à la crise économique historique actuelle, l'ingénieur joue un rôle déterminant. Face à la panoplie d'innovations, en parallèle de solutions connues et opérationnelles, l'ingénieur fait preuve de raison et de rigueur dans la sélection des technologies qui contribuent au développement des systèmes d'énergie durable et résiliente, indépendamment d'un rêve, d'une idéologie ou d'une tendance.

L'ingénieur suivra ces quatre règles dans sa contribution :

- 1. Adopter une approche systémique.** Le fait de se limiter à un élément dans une chaîne d'apports technologiques peut entraîner des erreurs dues au manque de considération d'autres liens. Un cas typique serait de considérer une énergie secondaire, comme l'électricité, l'hydrogène ou la chaleur, qui pollue très peu, mais la manière dont est produite l'énergie ou l'équipement dans la chaîne peut considérablement modifier les qualités du système.
- 2. Considérer les technologies matures comme une priorité.** La disponibilité temporelle des technologies est bien connue et peut être évaluée à l'aide d'outils tels que

l'échelle TRL (niveau de maturité technologique). Toutefois, le niveau de maturité d'une technologie doit être en rapport avec l'urgence climatique (GIEC, 2018a). De nombreuses études, principalement celles menées par le GIEC, envoient un message clair : nous devons agir maintenant pour réduire les émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2030. En réponse à l'urgence climatique, nous devons adopter les technologies matures dans le milieu industriel, en utilisant les compétences nécessaires. Moins de technologies matures verront le jour afin de consolider ou d'amplifier les résultats initiaux.

3. **Encourager les contributions importantes.** Il est essentiel de s'interroger sur la portée de la contribution d'une éventuelle technologie à la réalisation des objectifs fixés. Cette contribution potentielle est un élément déterminant de la sélection et doit être considérée sous ses différentes facettes : l'adaptabilité de la technologie ou la facilité de transfert de technologie sont deux critères à prendre en compte si la technologie doit apporter une contribution significative au mix énergétique mondial. Elle doit être évaluée par rapport aux ressources nécessaires au développement de la technologie, qui sont invariablement limitées, que ce soit en termes de recherche et développement, d'efforts de déploiement, d'investissement matériel ou humain, et souvent de mobilisation de l'aide publique.
4. **Promouvoir un critère économique simple : le coût par tonne de CO₂ évitée.** Tout le monde paye le prix de la crise économique et sociale provoquée par la COVID-19 : les gouvernements, les autorités locales, les entreprises et les ménages se sont tous retrouvés en difficulté financière. Afin de faire les bons compromis dans un cadre budgétaire contraint, il est nécessaire de disposer d'un critère simple, mais robuste qui représente au mieux l'efficacité économique. La comparaison des coûts par tonne de CO₂ évitée (ou son équivalent en CO₂ pour les autres gaz à effet de serre), qui est calculée dans une approche systémique, pour toutes les technologies peut aider à orienter les choix vers des technologies plus efficaces pour lutter contre les changements climatiques. Cependant, l'efficacité économique, qui n'est qu'un critère parmi tant d'autres, doit devenir une exigence en cette période de crise.

Recommandations

1. En vue de la réalisation des ODD, il est essentiel de développer des systèmes d'énergie durable et résiliente. Les réflexions doivent consister en une analyse rigoureuse des faits, sans idée préconçue. Pour atteindre ces objectifs, toutes les options en matière d'énergie sont ouvertes, selon les contextes nationaux.
2. Les ingénieurs doivent contribuer à éclairer les choix en adoptant des approches systémiques qui mettent en avant les technologies matures et disponibles dans l'immédiat qui sont d'une grande importance dans la lutte contre les changements climatiques.
3. Dans le contexte actuel lié à la pandémie de COVID-19, il est important de recourir à des critères économiques simples et transparents tels que le coût par tonne de CO₂ évitée.

Références

- AIE. 2020. *World Energy Outlook 2020*. Paris, Agence internationale de l'énergie. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>
- CME. 2016. *World Energy Scenarios 2016: The Grand Transition*. Londres, Conseil mondial de l'énergie. <https://www.worldenergy.org/publications/entry/world-energy-scenarios-2016-the-grand-transition>
- CME. 2020. World Energy Transition Radar. Conseil mondial de l'énergie. <https://www.worldenergy.org/transition-toolkit/world-energy-scenarios/covid19-crisis-scenarios/world-energy-transition-radar>
- FMOI. 2019. Déclaration de la FMOI sur l'urgence climatique. Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs. http://www.wfeo.org/wp-content/uploads/declarations/FMOI_Declaration_sur_lurgence_climatique.pdf
- GIEC. 2018a. *Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre, dans le contexte du renforcement de la parade mondiale au changement climatique, du développement durable et de la lutte contre la pauvreté*. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D. et al. (dir. publ.) https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_fr.pdf
- GIEC. 2018b. Résumé à l'intention des décideurs. *Réchauffement planétaire de 1,5 °C. Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre, dans le contexte du renforcement de la parade mondiale au changement climatique, du développement durable et de la lutte contre la pauvreté*. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D. et al. (dir. publ.) https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_fr.pdf

Jürgen Kretschmann³¹

3

3.6 INGÉNIERIE MINIÈRE POUR L'AVENIR



©THGA/Volker Wiclok

³¹ Président de l'université TH Georg Agricola, Bochum, Allemagne. Dernier président sortant de la Society of Mining Professors (Société des professeurs d'ingénierie minière, SOMP).

Résumé. L'exploitation minière peut contribuer positivement à la réalisation des 17 Objectifs de développement durable (ODD), mais l'industrie doit tout d'abord se réinventer. Au cours des trente dernières années, un vaste nombre de visions, d'objectifs, de méthodes, de technologies, de processus et d'autres mesures ont été mis au point par les universités, l'industrie et les gouvernements pour développer la durabilité des activités minières. Un bond en avant vers une exploitation minière améliorée et durable est cependant nécessaire, compte tenu des défis auxquels les ingénieurs miniers seront confrontés à l'avenir dans le monde entier.

Introduction

Un approvisionnement suffisant en matières premières dans des conditions de marché équitables est indispensable à un développement socioéconomique durable, du fait du lien créé entre quasiment toutes les chaînes de valeur des entreprises (SOMP, 2019). L'industrie minière mondiale s'est développée au cours des deux derniers siècles, et s'avère aujourd'hui plus importante que jamais. La population mondiale a augmenté de 54,43 % entre 1985 et 2018, passant de 4,9 à 7,5 milliards de personnes, tandis que la production minière mondiale a augmenté d'environ 84,5 %, passant de 9,9 milliards de tonnes métriques en 1985 à 17,7 milliards de tonnes métriques en 2018 (Reichl et Schatz, 2020). De plus, la population mondiale, qui a atteint 7,8 milliards de personnes avec une croissance rapide, exige un niveau de vie plus élevé, ce qui, associé à une tendance à l'urbanisation dans le monde entier, entraînera vraisemblablement une augmentation disproportionnée des activités minières à l'avenir. En dépit de l'optimisation nécessaire des processus de recyclage (l'« exploitation minière urbaine »), une demande importante sera constatée pour certaines matières premières en vue de faire évoluer le monde vers plus de durabilité, notamment le cuivre et les éléments des terres rares pour la production d'énergies renouvelables, ou le nickel, le manganèse, le lithium et le cobalt pour les batteries. Les sociétés minières, et en particulier les ingénieurs, font néanmoins face à des défis considérables (Drebenstedt, 2019) tels que :

- Des gisements plus profonds, plus escarpés ou non conventionnels (en raison de la raréfaction des gisements faciles d'accès) et des défis géotechniques.
- Une teneur ou une qualité de minerai plus faible et une augmentation des déchets miniers.
- Des sites d'exploitation minière isolés et des problèmes liés aux infrastructures.

- Des conditions d'extraction extrêmes.
- Un éventail de défis sociaux et environnementaux.
- Un manque de ressources humaines ainsi qu'une pénurie de main-d'œuvre qualifiée.
- Une réaction défavorable des communautés aux projets d'exploitation minière et des conflits.

À l'échelle mondiale, le secteur minier devient de plus en plus coûteux et les conditions de plus en plus difficiles. Compte tenu des nombreux facteurs internes et externes qui continuent d'exercer une pression sur les sociétés minières, les ingénieurs et leurs activités, on constate un besoin croissant de mettre en place davantage qu'un simple changement progressif. Le secteur minier de l'avenir se doit d'adopter de nouvelles approches des systèmes et technologies d'exploitation minière durable, qui représentent des avancées décisives dans les changements pour l'extraction et le traitement des minerais (SOMP, 2019).

Obligation d'avancées technologiques décisives dans le domaine de l'ingénierie minière

Au cours des siècles derniers, l'exploitation minière est devenue une industrie de haute technologie numérisée (exploitation minière 4.0), cessant ainsi d'être effectuée par de petites entreprises artisanales (exploitation minière 1.0). Ce développement suppose naturellement d'avoir recours à des innovations technologiques. Cette évolution progressive de l'exploitation minière et son amélioration continue vont se poursuivre. Il est indispensable de tenir compte des nouvelles technologies, des caractéristiques différentes et changeantes des gisements, des forces du marché et des questions sociales qui dépendent de l'acceptation du public, des approbations et des normes gouvernementales, ainsi que des améliorations volontaires en matière de performances et d'attentes relatives à la sécurité. La mise en place de systèmes innovants basés sur des données numériques à grande échelle (exploitation minière 4.0) améliorera aussi considérablement les possibilités en matière d'ingénierie minière. Il est par conséquent impératif d'obtenir des évaluations géologiques et économiques de l'efficacité opérationnelle et financière des projets d'exploitation minière prévus. En outre, la gestion des risques doit être définie, évaluée et estimée de manière approfondie afin de garantir des activités minières sûres et respectueuses de l'environnement tout en planifiant et en gérant le cycle minier complet : de l'exploration des gisements à la conception de la mine, à la production des minerais, et aux activités post-extraction faisant suite à la fermeture (Kretschmann, 2020). De surcroît, il est indispensable de tenir compte des performances qui incluent l'optimisation des ressources énergétiques et matérielles, ainsi que l'efficacité opérationnelle en vue d'une exploitation

minière en temps réel (c'est-à-dire d'une exploitation minière intelligente) (Litvinenko, 2019). Par conséquent, les éléments clés pour l'amélioration de l'ingénierie minière sont les suivants :

- Des normes de santé et de sécurité extrêmement élevées.
- Un impact limité sur les paysages et l'environnement.
- De faibles émissions spécifiques de dioxyde de carbone.
- Un niveau élevé de récupération des composants utiles des minerais.
- Une utilisation maximale de technologies télécommandées pour permettre au personnel de rester à distance de la zone d'extraction.
- Un stockage des roches stériles sans enlèvement à la surface.
- Une efficacité élevée des ressources et une compétitivité accrue.

L'industrie minière de haute technologie doit relever des défis grâce à des solutions globales et intégratives couvrant le cycle complet d'exploitation minière, de l'exploration et de la conception à la production et aux activités post-extraction. En outre, il s'avère indispensable d'améliorer la sécurité, l'impact environnemental, les émissions, le taux de récupération, les opérations contrôlées à distance, l'efficacité et la compétitivité.

Nécessité de modèles commerciaux viables pour une exploitation minière durable

Dans leur revue systématique de la littérature, de Mesquita *et al.* (2017) ont décrit les avancées de la recherche universitaire dans le domaine de l'exploitation minière, de la durabilité et du développement durable. Ils ont recensé 1 157 articles publiés dans 491 revues différentes, rédigés par 3 230 auteurs liés à 1 334 institutions, lesquelles étaient situées dans 93 pays. Il ne fait par conséquent aucun doute qu'il existe de nombreuses connaissances permettant d'avoir recours à des pratiques minières durables. Dans leur ouvrage, *Mining, Materials, and the Sustainable Development Goals (SDGs): 2030 and Beyond* (Parra, Lewis, et Ali, 2021), les auteurs exposent leur vision de la manière dont les ingénieurs miniers et les sociétés minières peuvent contribuer à la réalisation des 17 ODD et du Programme de développement durable à l'horizon 2030. En outre, ils ne citent pas moins de 18 initiatives internationales de durabilité dans le secteur de l'exploitation minière. Par conséquent, aucune société minière internationale active n'obtient de mission entrepreneuriale sans mentionner la durabilité comme objectif principal de ses activités minières. Pourtant, Parra, Lewis et Ali constatent qu'il n'existe actuellement aucune approche descendante pour évaluer si les effets cumulés de ces contributions universitaires ou commerciales sont suffisamment importants afin d'aider de manière significative à réaliser les ODD.

Il n'existe actuellement aucune méthode normalisée permettant de mesurer l'impact d'une activité afin de déterminer si et comment ces contributions clés s'améliorent de manière significative et mesurable en vue de la réalisation du Programme de développement durable à l'horizon 2030 à l'échelle mondiale. En outre, il convient de déterminer *qui* doit être chargé d'évaluer la qualité et l'efficacité. Serait-il possible pour les sociétés minières de déterminer leur « responsabilité » à l'égard d'un objectif ou d'un sous-objectif spécifique ? Est-il envisageable de la déterminer en fonction des revenus, des bénéfices, du volume de production ou d'autres paramètres ?

Enfin, dernière question et non des moindres, qui décide si un projet d'exploitation minière contribue positivement ou non aux ODD, et quelles sont les conséquences de cette décision. À l'heure actuelle, les décisions relatives aux projets d'exploitation minière sont principalement prises par les parties prenantes, selon une approche ascendante. L'investissement nécessaire pour mettre en place un projet d'exploitation minière à grande échelle peut facilement atteindre plusieurs milliards de dollars des États-Unis (Litvinenko, 2019). À ce jour, nous constatons une forte tendance qui a une incidence sur l'industrie minière avec la hausse mondiale des investissements ESG (environnementaux, sociaux et de gouvernance). Cette tendance repose sur l'idée que l'intégration d'une analyse des facteurs environnementaux, sociaux et de gouvernance d'un investissement potentiel peut contribuer à améliorer les rendements, en plus des mesures financières traditionnelles.

Il est recommandé aux entreprises minières de recadrer ou de repositionner leurs activités en mettant en œuvre des modèles d'entreprise qui ont pour objectif d'atteindre la durabilité et qui assurent ainsi leur attrait pour les investisseurs potentiels. De plus, une étude industrielle réalisée par EY en 2020 arrive à la conclusion que le plus grand risque encouru par l'industrie minière est la perte de l'« acceptation sociale de son exploitation ». Elle décrit l'évolution de la relation entre l'industrie minière et ses parties prenantes locales ou régionales, englobant les concepts d'équité, de confiance et d'acceptation en matière de procédure et de distribution (Laurence, 2020).

Prise en étau entre les militants régionaux et les investisseurs internationaux, l'industrie minière doit mettre en place des modèles commerciaux stratégiques durables afin d'atteindre un point d'équilibre entre les intérêts concurrents et complémentaires des principales parties prenantes. Les gens conviennent généralement qu'un monde sans exploitation minière n'est pas envisageable, mais quelles sont les répercussions pour un projet spécifique dans leur communauté, surtout si le traitement et l'utilisation d'une matière première ont lieu à l'étranger et que les déchets miniers, la pollution et parfois même les catastrophes environnementales restent « chez eux » ? Le rapport de l'enquête mondiale sur l'industrie minière 2020 (2020 Global Mining

Survey Report) a révélé que 75 % des personnes interrogées estiment que l'industrie minière doit redéfinir la notion de succès en utilisant un groupe de mesures plus globales prenant en compte les valeurs de toutes ses parties prenantes (KPMG, 2020). L'utilisation conséquente de modèles économiques d'exploitation minière durables constitue donc une nécessité, et il est nécessaire qu'une autorité minière compétente et forte tienne un rôle de superviseur à tous les niveaux gouvernementaux.

3 Gros plan sur l'éducation, la recherche et le développement

Pour 2030 et au-delà, l'un des principaux objectifs de l'ingénierie minière devrait être de favoriser et d'entretenir une culture de recherche et de développement qui offre également de nouvelles possibilités d'emploi aux ingénieurs disposant de qualifications supérieures et capables de mettre en œuvre de nouvelles technologies au sein de l'industrie. Par ailleurs, les ingénieurs miniers actuels et futurs doivent avoir l'ambition d'améliorer ou d'apprendre à adopter les connaissances scientifiques, les innovations technologiques et les technologies émergentes d'autres disciplines. En outre, ils doivent être capables d'améliorer la capacité et la croissance des entreprises, d'assurer la durabilité du secteur minier dans un paysage technologique en rapide mutation et d'établir des partenariats stratégiques efficaces et engageants. Dans cette optique, les qualités suivantes sont indispensables à un futur ingénieur minier (SOMP, 2019) :

- Des compétences techniques de haute qualité.
- Une compréhension et une capacité à utiliser, optimiser et s'adapter à des technologies innovantes et en évolution rapide, en particulier les technologies numériques.
- Une connaissance approfondie des données et la capacité de travailler avec des quantités importantes de données afin d'obtenir des systèmes de gestion et de contrôle efficaces.
- La capacité de planifier et d'exploiter des mines avec des empreintes de surface et des impacts environnementaux plus acceptables sur le plan social.
- Une compréhension de toute la chaîne de valeur de l'exploitation minière grâce à une approche plus globale et systémique de la planification et de l'exploitation.
- La capacité d'adopter une approche de la planification, de la prise de décision et de la gestion basée sur le risque.
- Une vision globale ou internationale, tout en étant capable de travailler dans un environnement local et avec une compréhension claire des contraintes locales.
- La capacité de travailler et diriger des équipes multidisciplinaires.

Le rôle d'une école d'ingénierie minière est de former des ingénieurs miniers pour l'avenir par l'intermédiaire de

changements de programmes et d'expériences éducatifs. Cela implique une collaboration entre l'industrie minière et des experts technologiques afin d'accélérer à la fois l'innovation et la commercialisation, en vue de créer une valeur ajoutée pour le secteur minier. Pour ce faire, il est nécessaire de mettre en place des initiatives de recherche de pointe et de recommander les ingénieurs miniers disposant des normes éthiques et de l'intégrité les plus élevées (SOMP, 2019), et ainsi garantir la réalisation des ODD. Par conséquent, il est nécessaire d'évaluer les programmes miniers actuels à travers le monde afin de déterminer s'ils répondent à ces critères et de quelle manière, dans l'optique de pouvoir apporter d'éventuelles améliorations.

Recommandations

En s'appuyant sur une approche de pointe en matière d'ingénierie minière durable, voici trois actions initiales visant à rendre l'industrie minière durable à l'échelle mondiale :

1. De nombreuses technologies appropriées ont été mises au point, et les institutions gouvernementales, les formateurs dans le domaine de l'ingénierie, l'industrie et les institutions professionnelles d'ingénierie de ces pays devraient être habilités à les utiliser pour permettre au domaine de l'exploitation minière de gagner en durabilité (PNUD et ONU Environnement, 2018).
2. La mise en place d'un groupe de travail dirigé par l'UNESCO pourrait permettre d'obtenir des suggestions de modèles commerciaux durables applicables aux entreprises minières, dans un éventail allant des opérations artisanales à faible technologie et informelles aux grandes entreprises multinationales. Ces modèles devraient faire l'objet de discussions avec les représentants gouvernementaux des pays miniers, l'industrie, les investisseurs financiers, les ONG et les institutions professionnelles d'ingénierie minière dans l'optique de mettre en place le cadre nécessaire et d'appliquer des méthodes de mesure basées sur les ODD.
3. Les gouvernements et les établissements d'enseignement supérieur devraient prendre des mesures de manière à améliorer l'enseignement et les possibilités d'apprentissage tout au long de la vie dans le domaine de l'exploitation minière. Des centres de recherche et d'enseignement spécialisés (Litvinenko, 2019) devraient voir le jour afin d'encourager les pratiques minières durables à l'échelle mondiale et d'inciter davantage de jeunes à envisager une carrière dans le domaine de l'ingénierie minière, notamment les filles. Cela peut constituer une solution en vue de remédier à la récente pénurie d'ingénieurs ainsi que de garantir la diversité des réflexions et la participation de tous, ce qui est primordial afin d'atteindre tous les Objectifs de développement durable.

Références

- De Mesquita, R.F. Xavier, A., Klein, B. et Matos, F.R.N. 2017. Mining and the Sustainable Development Goals: A systematic literature review. *Proceedings of the 8th International Conference on Sustainable Development in the Minerals Industry*, p. 6. <https://ojs.library.dal.ca/greebookseries/issue/view/695>
- Drebenstedt, C. 2019. Responsible mining approach for sustainable development – research concept and solutions. *Journal of Engineering sciences and Innovation*, vol. 4, n° 2/2019, pp. 197 - 218.
- EY. 2020. Les principaux risques et opportunités business du secteur minier en 2019-20. https://www.ey.com/fr_fr/mining-metals
- KPMG. 2020. *Risks and opportunities for mining. Global Outlook 2020. Australie : KPMG*. <https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/xx/pdf/2020/02/risks-and-opportunities-for-mining.pdf>
- Kretschmann, J. 2020. Sustainable change of coal-mining regions. *Mining, Metallurgy & Exploration*, vol. 37, n° 1, pp. 167 - 178.
- Laurence, D. 2020. The devolution of the social licence to operate in the Australian mining industry. *The Extractive Industries and Society*. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2020.05.021>
- Litvinenko, V.S. 2019. Digital economy as a factor in the technological development of the mineral sector. *Natural Resources Research*, vol. 29, pp. 1521 - 1541.
- Parra, C., Lewis, B. et Ali, S.H. (dir. publ.) 2021. *Mining, Materials, and the Sustainable Development Goals (SDGs). 2030 and Beyond*. Boca Raton et Abingdon, CRC Press.
- PNUD et PNUE. 2018. *Managing mining for sustainable development: A sourcebook*. Bangkok, Programme des Nations Unies pour le développement.
- Reichl, C. et Schatz, M. 2020. *World Mining Data 2020*. Vienne, Ministère fédéral de l'agriculture, des régions et du tourisme de la République d'Autriche.
- SOMP. 2019. Mines of the Future, Version 1.0 (Major Findings). Society of Mining Professors/Societät der Bergbaukunde/Société des professeurs d'ingénierie minière. <https://miningprofs.org>

Sudeendra Koushik³²

3.7 INGÉNIERIE ET MÉGADONNÉES



wavebreakmedia/Shutterstock.com

32 Comité de l'information et de la communication de la FMOI, Inde.

Résumé. La disponibilité de grandes quantités de données hétérogènes issues de sources multiples et connaissant une croissance exponentielle a rendu indispensable la mise en place de stratégies ainsi que le développement de processus et d'algorithmes destinés à analyser efficacement les grands ensembles de données. Cela a offert de nouvelles possibilités aux chercheurs, aux ingénieurs et aux entrepreneurs dans divers domaines et souligne que les bases de données et les outils traditionnels qui servaient principalement à traiter des données structurées sont devenus inadaptes. Les perspectives stratégiques des données ont donc radicalement évolué, entraînant l'évolution des mégadonnées (tableau 1). Les technologies des mégadonnées reposent sur l'utilisation des données collectées, témoignant de leur immense potentiel dans l'optique d'améliorer les pratiques d'ingénierie en matière d'efficacité, de sécurité, de résilience et de respect de l'environnement, ce qui a conduit l'ingénierie à évoluer vers un nouveau paradigme axé sur les données.

Les systèmes de mégadonnées englobent de nombreuses technologies et gammes de compétences évolutives. Ces dernières comprennent la connaissance du domaine, l'analyse des données, la connaissance statistique et les compétences avancées de visualisation des données. Cet écosystème diffère fortement des concepts antérieurs de stockage de données, de veille économique et de langage structuré d'interrogation, qui se sont avérés être des précurseurs du paradigme des mégadonnées (Mohanty *et al.*, 2013).

Par exemple, YouTube génère environ 100 pétaoctets de nouvelles données chaque année (Stephenson, 2018) et environ 72 heures de vidéo chaque minute (Chen *et al.*, 2014), tandis que Facebook génère plus de 10 pétaoctets de données de journal chaque mois. Des données commerciales en ligne de plusieurs dizaines de téraoctets sont générées par des plateformes de commerce électronique telles que Taobao, et l'on peut s'attendre à ce que les données provenant d'Internet atteignent environ 2 zettaoctets par an d'ici à 2020 (Stephenson, 2018). Il existe une multitude de sources de données multiformats, notamment par des capteurs intégrés dans divers appareils allant des téléphones mobiles aux machines industrielles dans le cadre du paradigme global de l'Internet des objets, ainsi que par l'intermédiaire des technologies d'informatique dématérialisées (McKinsey, 2011) (figure 1).

Figure 1. Sources communes de données

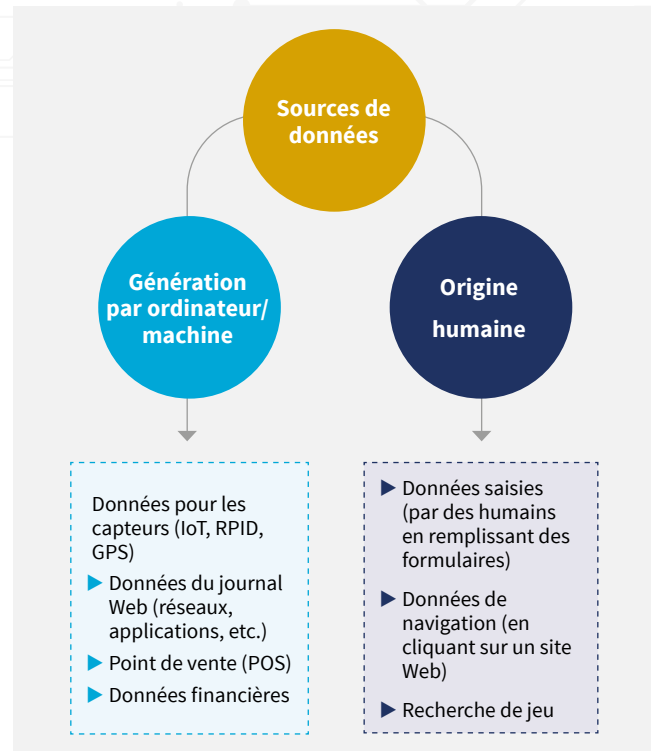


Tableau 1. Perspectives stratégiques des données : l'analogique face à l'ère numérique

| Ère analogique | Ère numérique |
|---|---|
| Données onéreuses | Données produites en continu par une multitude de sources |
| Défis en matière de stockage et de gestion des données | Défis de la transformation des données en informations utiles |
| Seules les données standard sont utilisées pour analyse | Données non structurées de plus en plus exploitables et utiles |
| Données gérées en silos fonctionnels | Valeur de l'approvisionnement, du stockage et du traitement des données supérieure aux silos fonctionnels |
| Données comme outil d'optimisation des processus | Données comme actifs corporels indispensables à la création de valeur |

Pour un usage technologique, les mégadonnées facilitent la prise de décision, en couvrant des domaines de manière innovante, tels que le commerce, la biomédecine et l'ingénierie, sans oublier la prévision et l'analyse, indépendamment du volume des données. Par exemple, des scientifiques ont eu recours à la technologie des mégadonnées de manière efficace afin de collecter et d'analyser des quantités énormes de données, permettant ainsi la découverte du boson de Higgs au centre de recherche du CERN en 2012 (Stephenson, 2018).

Obligations liées aux mégadonnées **Analyses des mégadonnées**

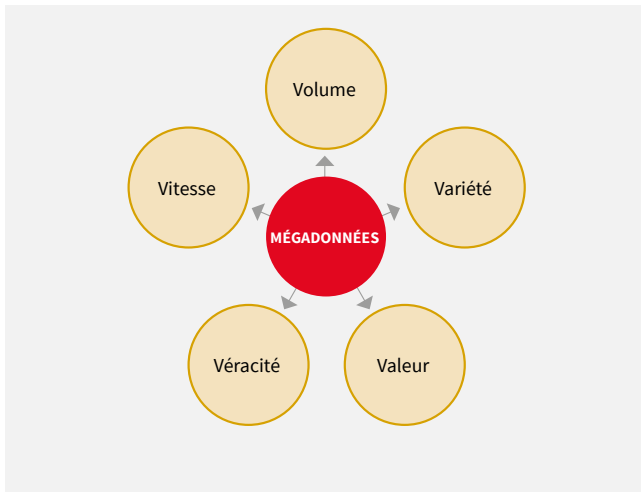
Les mégadonnées ont été définies comme « un grand volume, une grande vitesse ou une grande variété d'informations qui exigent des formes innovantes et rentables de traitement de l'information permettant une meilleure compréhension, la prise de décision et l'automatisation des processus » (ONU, 2012). Les trois caractéristiques, ou les 3 « V » des mégadonnées sont les suivantes :

- Volume : très grande échelle en raison de la production de grandes quantités de données issues de sources multiples.
- Vitesse : nécessité d'une collecte et d'une analyse rapides des données afin d'optimiser la valeur du processus.
- Variété : données variées, c'est-à-dire impliquées, structurées, semi-structurées (XML, EDI, etc.) et non structurées (vidéo, pages Web, texte, etc.).

Outre ces caractéristiques, deux autres caractéristiques ont fréquemment été associées aux mégadonnées : la « véracité » et la « valeur ». La véracité désigne la qualité des informations provenant de sources multiples et la « valeur » désigne l'importance et la pertinence des données disponibles ainsi que leur utilité dans le cadre d'une analyse (Kambatla *et al.*, 2014 ; Diebold, 2012) (figure 2). On peut supposer que « les mégadonnées concernent moins les données importantes que la capacité de rechercher, d'agréger et de recouper de grands ensembles de données » (Boyd et Crawford, 2012).

Les questions de sécurité et de respect de la vie privée constituent toujours un sujet de préoccupation. Il en va de même pour la normalisation des cadres et l'architecture des mégadonnées. À cet effet, le National Institute of Standards and Technology (NIST) du Ministère américain du commerce a mis en place un groupe de travail public sur les mégadonnées³³ (NBD-PWG), dont l'objectif est de traiter en particulier les concepts fondamentaux relatifs aux mégadonnées, et de nombreuses organisations d'ingénierie, telles que la FMOI, ont également appelé à faire preuve de responsabilité dans le traitement de ces mégadonnées dans l'exercice de la profession³⁴.

Figure 2. Caractéristiques des mégadonnées



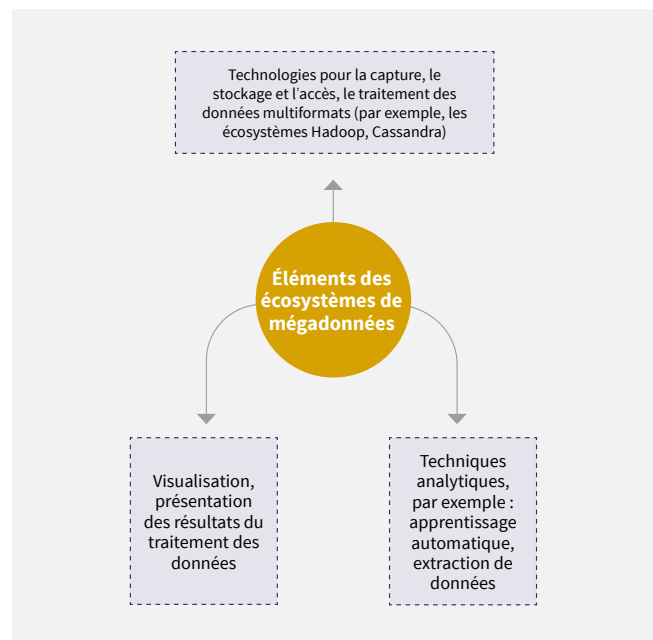
La principale motivation pour le développement futur de l'écosystème de mégadonnées reste la création de valeur ajoutée, ce qui souligne la nécessité de faire des économies relatives à l'ensemble du processus, de la collecte au traitement et à la visualisation (figure 3).

Avec l'usage accru de moteurs de recherche comme Google, il est devenu de plus en plus indispensable d'effectuer des recherches rapides dans de grandes bases et de grandes sources de données afin de les rendre disponibles aux utilisateurs en temps réel. Divers algorithmes ont été mis au point dans cette optique et Google a élaboré un cadre logiciel (Hadoop), qui a servi de source d'inspiration pour de nombreux autres systèmes.

Les différents outils disponibles et en cours de développement peuvent être classés selon les éléments fonctionnels suivants relatifs à la génération, au traitement et aux résultats des mégadonnées (Oussous *et al.*, 2018) :

- Intégration des données pour le téléchargement et l'intégration aux systèmes.
- Stockage distribué tel que le stockage en attachement direct (DAS), le stockage en réseau (NAS) et le réseau de stockage (SAN).
- Gestion centralisée pour inclure les diagnostics, la surveillance et correspondre à un scénario d'entreprise.
- Analyse incluant des outils d'apprentissage automatique.
- Sécurité et contrôle de l'accès à la vie privée, en particulier dans le cas de sources de données multipropriétaires.

Figure 3. Éléments d'un écosystème de mégadonnées

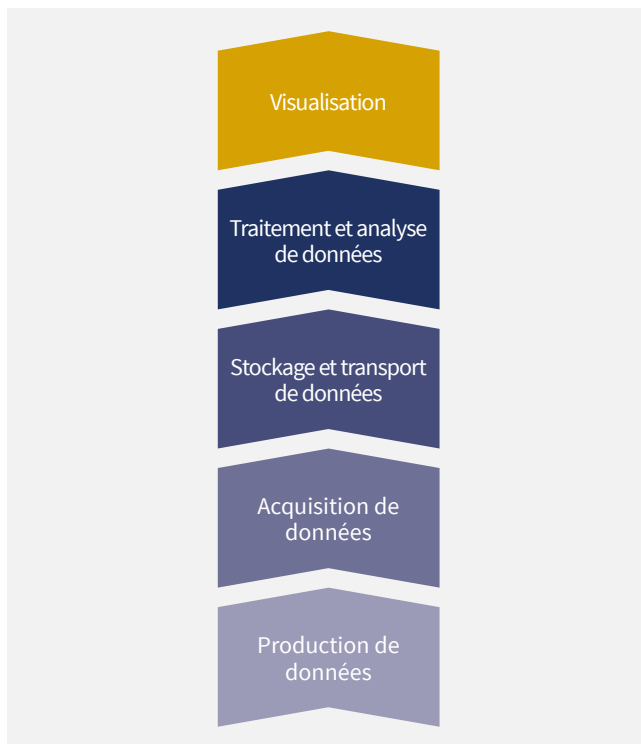


33 Site Web officiel du National Institute of Standards and Technology (NIST) : www.nist.gov

34 Pour plus d'informations sur les mégadonnées et les principes de l'intelligence artificielle en ingénierie par la FMOI : <http://www.wfeo.org/big-data-and-ai-principles-in-engineering>

Les technologies d'intelligence artificielle et d'apprentissage automatique ont grandement tiré parti de ces progrès, car d'immenses quantités de données sont désormais disponibles pour faciliter ce type d'apprentissage (comme l'apprentissage profond et les réseaux de neurones artificiels). Les outils pour le paradigme des mégadonnées permettent en outre aux ordinateurs d'atteindre des niveaux de performance attendus auparavant des superordinateurs (Stephenson, 2018). Les techniques d'intelligence artificielle enrichissent, pour leur part, l'analyse des mégadonnées, en particulier dans le traitement des données non structurées. Les bases de données, conçues afin de gérer l'accès aux données non relatives au langage structuré d'interrogation, constituent un élément clé du système de mégadonnées. Elles font partie de la catégorie NoSQL, et sont uniques en matière de « caractéristiques et de philosophie de conception » (Mohanty *et al.*, 2013). La visualisation des résultats de l'analyse des données, de façon simple et efficace, est fondamentale et demande de l'innovation et de la créativité tout au long de la chaîne de valeur des données (figure 4).

Figure 4. Chaîne de valeur des données



Applications de mégadonnées

Le potentiel transformateur des mégadonnées est généralement accepté dans le domaine des soins de santé, de l'administration du secteur public, de la vente au détail et de l'industrie, ainsi

que de la localisation personnelle (McKinsey, 2011). À l'heure actuelle, les applications de mégadonnées sont principalement utilisées dans le secteur des entreprises, mais la situation évolue rapidement, car d'autres prennent conscience de l'énorme valeur ajoutée de cette technologie. À titre d'exemple, les gouvernements du monde entier s'appuient sur l'analyse des mégadonnées afin de cibler et de relever les défis, et de mettre au point des programmes efficaces, en particulier dans les pays en développement. On a constaté que les mégadonnées ont le potentiel de « suivre les progrès du développement, d'améliorer la protection sociale et de comprendre les ajustements à effectuer dans les politiques et les programmes existants »³⁵.

Consciente de l'importance des mégadonnées pour le développement, la Commission de statistique des Nations Unies a créé en 2014 le Groupe de travail mondial sur l'utilisation des mégadonnées en statistique officielle, qui comprend une compilation des indicateurs des Objectifs de développement durable pour le Programme de développement durable à l'horizon 2030³⁶. Certains des domaines dans lesquels les mégadonnées créent une valeur significative sont cités ci-dessous.

- L'analyse de mégadonnées est extrêmement précieuse dans le secteur manufacturier, étant donné qu'elle permet l'intégration de données provenant de différents départements pour faciliter l'ingénierie simultanée, améliorant ainsi la qualité et la productivité (McKinsey, 2011).
- Les mégadonnées ont des applications considérables dans la conception d'infrastructures, ce qui permet d'obtenir d'excellents résultats et de faire des économies.
- La gestion de la chaîne d'approvisionnement a grandement profité de la visibilité accrue des mouvements logistiques ainsi que de l'utilisation des commentaires des utilisateurs, et constitue un exemple souvent cité d'application de la technologie des mégadonnées.
- Dans le secteur de la vente au détail, les mégadonnées permettent d'améliorer la satisfaction des consommateurs en gérant la perception du public, la gestion des marques, la réponse des clients, l'analyse des tendances d'achat et l'innovation ciblée des produits.

Les données obtenues des patients sont utilisées efficacement afin d'administrer les meilleurs soins possibles, allant des examens de diagnostic au dosage médical. Le séquençage génétique pour le traitement des maladies repose sur des technologies de mégadonnées en raison de la grande quantité de données à traiter. Pendant la pandémie actuelle de COVID-19, la technologie des mégadonnées est largement utilisée pour permettre l'identification des cas et la mise en place du traitement chez les personnes contaminées.

³⁵ Selon la définition apparaissant dans le glossaire de Gartner : <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/big-data>

³⁶ Pour plus de précisions au sujet du Groupe de travail mondial sur l'utilisation des mégadonnées en statistique officielle, consulter le lien suivant : <https://unstats.un.org/bigdata>

L'ingénierie au service du développement durable

- Dans le domaine de l'éducation, les mégadonnées sont efficaces pour évaluer les performances des enseignants et des étudiants, et afin de mesurer les résultats de l'enseignement, entre autres critères.
- Dans le secteur de l'énergie, les lecteurs de compteurs intelligents permettent de collecter fréquemment des données qui sont par la suite utilisées pour l'analyse des habitudes de consommation, ce qui conduit à un déploiement et une utilisation optimale des services publics.

Bien qu'il soit admis que les mégadonnées seraient fondamentales pour un développement efficace et durable à l'avenir, les défis concernent la disponibilité d'une main-d'œuvre spécialisée, la puissance de calcul et les ressources déployées (Espinosa, 2019). Certains des principaux défis liés aux mégadonnées en matière d'analyse sont présentés ci-dessous (Ekbia *et al.*, 2015 ; Chen et Zhang, 2014 ; Jagdish *et al.*, 2014).

- Extraction de données sur plusieurs plateformes et intégration.
- Traitement d'une quantité importante de données en temps réel.
- Prévion et mise en place de modèles prédictifs et création d'algorithmes adaptés à cet objectif.
- Mise en place de processus appropriés en vue d'assurer la prise de décision basée sur l'analyse de mégadonnées.
- Garantie de la consistance suffisante de l'analyse de mégadonnées afin de détecter les anomalies sous-jacentes dans le grand ensemble de données utilisé. Disponibilité de techniques de gestion des données comme impératif fondamental pour assurer la collecte et la mise à jour de données sécurisées et en temps réel, et pour garantir la sécurité des données.
- Visualisation des données de manière cohérente, en particulier en gardant à l'esprit les multiples utilisations des données qui sont structurées, non structurées et hybrides.

Futur des mégadonnées

La convergence des données et des analyses évolue rapidement et il est possible que cela donne lieu à la nécessité d'une collaboration et d'une communication accrues afin d'en tirer davantage parti.

On assiste à la mise au point continue de techniques et d'algorithmes afin d'analyser de grandes quantités hétérogènes de mégadonnées provenant de sources multiples. La validation des résultats des analyses effectuées constitue cependant un problème majeur (Kambatla *et al.*, 2014). Une nouvelle architecture de système et de logiciel serait nécessaire afin de traiter la quantité gigantesque de données produites et mises à disposition pour l'analyse (Espinosa *et al.*, 2019), nécessitant des compétences particulières, une innovation de très haut niveau, une flexibilité dans la conception, ainsi qu'un cadre de gouvernance et de sécurité pour gérer cet écosystème en

pleine croissance. L'évolution rapide des technologies de chaînes de blocs faciliterait l'analyse des mégadonnées.

Pour les ingénieurs, le futur des résultats de l'analyse des mégadonnées sera particulièrement utile dans plusieurs domaines, notamment la maintenance prédictive et préventive et la conception de produits et de structures, permettant ainsi une gestion de projet plus efficace et une meilleure rentabilité dans un environnement de développement durable.

Recommandations

1. Acquisition de plus de compétences dans les domaines de la technologie des données de la part des ingénieurs, de manière à exploiter les avantages offerts par les mégadonnées dans certaines applications d'ingénierie.
2. Facilitation de la localisation, l'accessibilité, l'interopérabilité et la réutilisation des données de façon éthique par les gouvernements et les propriétaires de données.
3. Élaboration de règles et de normes sur la base d'un consensus mondial pour permettre un partage et un échange efficaces des données.
4. Intégration de la sécurité et de la confidentialité des données dans les processus de conception à tous les stades du paradigme des mégadonnées en raison de leur pertinence accrue.
5. Mise en place nécessaire de cadres réglementaires s'inspirant du règlement général sur la protection des données (RGPD) de manière à les exploiter dans le respect de la vie privée et des droits fondamentaux, offrant ainsi la possibilité d'une collaboration sans frontières.
6. Révision des normes et protocoles relatifs à la valeur capitalistique des données par les entreprises et les régulateurs afin d'encourager, d'inciter ou de pénaliser la production de données et de prévenir les abus en cas d'usage à des fins malveillantes.

Références

- Boyd, D. et Crawford K. 2012. Critical questions for big data. *Information, Communication & Society*, vol. 15, n° 5, pp. 662 - 679.
- Chen, C.P. et Zhang, C-Y. 2014. Data intensive applications, challenges, techniques and technologies: A survey on Big Data. *Information Sciences*, vol. 275, pp. 324 - 347.
- Chen, M., Mao, S. et Liu Y. 2014. Big Data: A survey, *Mobile Network Applications*, vol. 19, pp. 171 - 209.
- Diebold, F.X. 2012. On the Origin(s) and Development of the Term 'Big Data'. 2012. *Document de travail n° 12-037 du PIER*, 8 p. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2152421>.
- Ekbja, H., Mattioli, M., Kouper, I., et al. 2015. Big data, bigger dilemmas: A critical review. *Journal of the Association for Information Science and Technology*, vol. 66, n° 8, pp. 1523 - 1545.
- Jagdish, H.V. et al. 2014. Big data and its technical challenges. *Communication of the ACM*, vol. 57, n° 7, pp. 86 - 94.
- Kambatla, K., Kollias, G., Kumar, V. et Grama, A. 2014. Trends in big data analytics. *Journal of Parallel Distributed Computing*, vol. 74, n° 7, pp. 2561 - 2573.
- McKinsey. 2011. Big Data: The next frontier for innovation, competition and productivity. Rapport du McKinsey Global Institute.
- Mohanty, S., Jagadeesh M. et Srivasta, H. 2013. *Big Data Imperatives*. New York, Apress.
- ONU. 2012. Big Data for Development: Challenges and Opportunities. White Paper. Initiative Global Pulse des Nations Unies. <http://unglobalpulse.org>
- Oussous, A. Benjelloun, F.-Z., Lahcen, A.A. et Belfikih, S. 2018. Big Data technologies: A Survey. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*, vol. 30, pp. 431 - 448.
- Stephenson, D. 2018. *Big Data Demystified*. Harlow, Royaume-Uni, Pearson.

**Gong Ke³⁷, Li Pan³⁸, George Liu³⁹,
Paolo Rocca⁴⁰ et Jianping Wu⁴¹**

3.8 INGÉNIERIE ET INTELLIGENCE ARTIFICIELLE



Available under CC-BY-NC-ND 2.0 This is Engineering

- 37 Président de la Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs (FMOI).
38 Membre du groupe de travail de la FMOI et du CEIT (Comité technique permanent de l'ingénierie des technologies innovantes) sur les mégadonnées et l'intelligence artificielle.
39 Membre du groupe de travail de la FMOI, du CEIT et de Microsoft sur les mégadonnées et l'IA.
40 Professeur à l'Université de Trente, et membre du groupe de travail de la FMOI et du Comité technique permanent de l'ingénierie des technologies innovantes sur les mégadonnées et l'IA.
41 Professeur à l'Université Tsinghua.

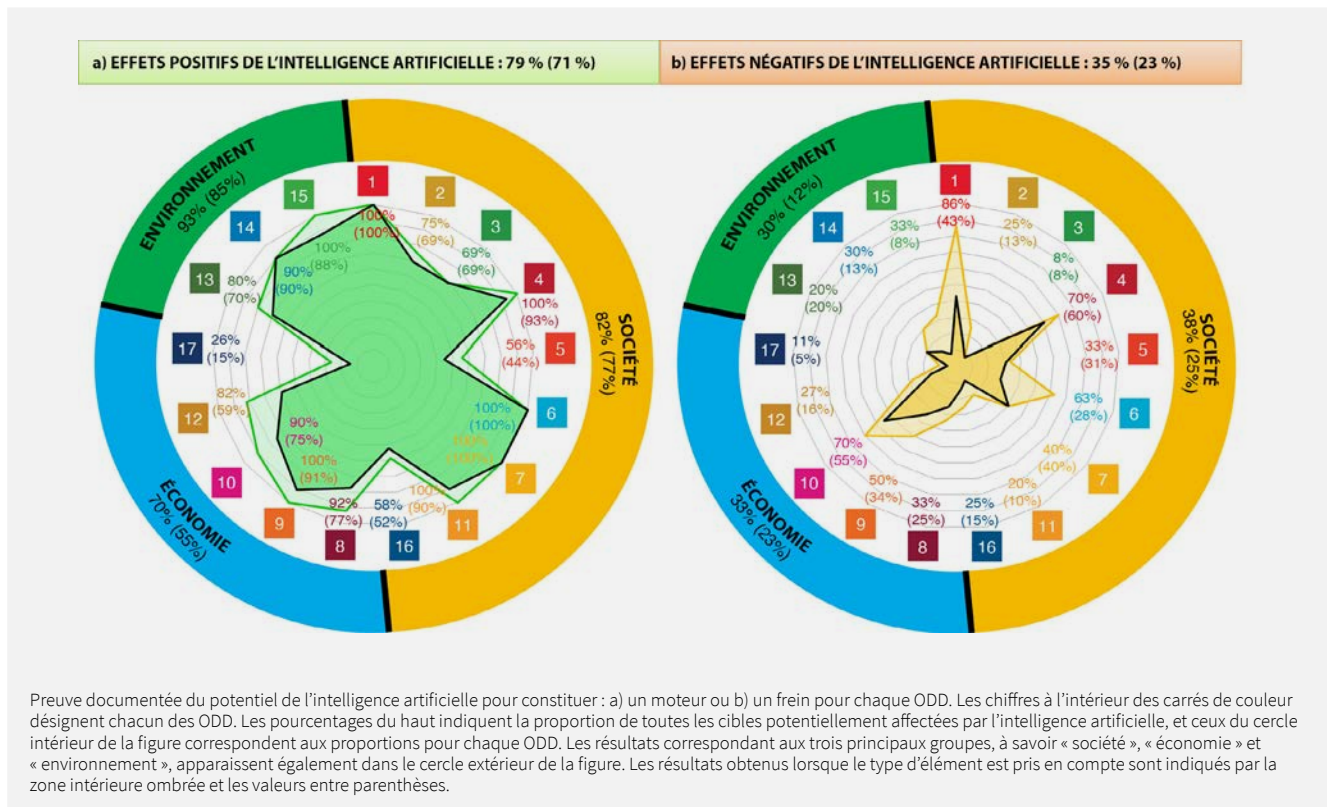
Résumé. L'intelligence artificielle occupe un rôle essentiel dans la quatrième révolution industrielle et a un effet sur l'ensemble des aspects du développement économique et social de la fabrication de pointe, de l'approvisionnement en énergie, des transports, des soins de santé, de l'éducation et de l'agriculture, aux différents types de commerce, de services sociaux et de tâches ménagères. Étant donné qu'elle constitue une forme puissante de technologie générale, l'intelligence artificielle peut stimuler l'ingénierie afin d'atteindre les ODD, tout en ayant des effets négatifs, notamment sur la vie privée et la sécurité. Il en va de la responsabilité des ingénieurs de s'assurer que les applications d'intelligence artificielle ont un effet positif sur l'ensemble de la population et sur l'environnement.

L'intelligence artificielle (IA) désigne la faculté des machines et des systèmes à acquérir et à mettre des connaissances en application, tout en adoptant un comportement intelligent (OCDE, 2016 ; CNUCED, 2017). Elle a une influence considérable sur la société, l'économie et l'environnement et constitue l'un des principaux moteurs de la quatrième révolution industrielle (Schwab, 2017). Selon une enquête de McKinsey, l'adoption de l'intelligence artificielle pourrait entraîner une hausse du PIB mondial de 13 000 milliards de dollars des États-Unis et contribuer à sa croissance à hauteur de 16 % d'ici à 2030 (McKinsey, 2018).

Après des efforts de mise au point de plus d'un demi-siècle, l'intelligence artificielle est désormais utilisée dans les applications d'ingénierie, grâce à des algorithmes d'apprentissage approfondi et aux mégadonnées. Elle valorise et transforme chaque aspect de l'ingénierie. Son incroyable potentiel peut entraîner une hausse de la productivité, de la qualité, de la sécurité et de l'efficacité de divers projets d'ingénierie. Elle s'avère, en outre, très prometteuse et pourrait accélérer la réalisation des 17 Objectifs de développement durable, malgré quelques effets négatifs potentiels présentés dans la figure 1 (Vinuesa *et al.*, 2020).

Bien que les progrès de l'IA sautent aux yeux, cette technologie n'est pas parfaite pour autant. Il est nécessaire de garantir une recherche et un développement intensifs ainsi qu'une implication importante des parties prenantes afin que l'IA tienne compte des valeurs humaines relatives au développement durable (UNESCO, 2019), pour le bien de l'humanité et pour l'environnement (Hawking, 2017).

Figure 1. Résumé des répercussions positives et négatives de l'intelligence artificielle sur les différents ODD



Ingénierie d'autonomisation de l'intelligence artificielle pour les ODD

L'intelligence artificielle intègre, autonomise et transforme l'ensemble des domaines de l'ingénierie. Elle stimule l'innovation afin d'optimiser les charges de travail et les processus grâce à la hausse de la productivité, au renforcement de l'efficacité et à la réduction des dépenses de manière plus intelligente et automatique. En parallèle, elle contribue à l'amélioration des conditions de travail des employés en les soulageant de tâches dangereuses et répétitives, ainsi qu'en créant de nouveaux emplois. L'IA aide les gens à comprendre et à exploiter la croissance des données ainsi qu'à répondre à une myriade de problématiques issues du monde réel. Les exemples ci-dessous montrent comment elle favorise la mise en œuvre des Objectifs de développement durable.

Soins médicaux

Comme indiqué dans la section 3.1, le potentiel de l'IA dans le domaine de la santé est immense. Il semblerait qu'il n'y ait pratiquement aucun aspect de la fourniture et de la gestion des soins de santé pour lequel l'IA ne puisse être appliquée, des utilisations cliniques pour le diagnostic et le traitement à la recherche biomédicale, à la découverte de médicaments, en passant par les services administratifs et la gestion. Le nombre d'applications potentielles augmente quotidiennement. Avec les défis importants auxquels sont confrontés les systèmes de santé à long terme, notamment le vieillissement rapide de la population et les maladies chroniques multiples, le manque de main-d'œuvre et de compétences, l'augmentation des dépenses de santé, dont une partie est gaspillée, voire nocive, et les nouvelles menaces comme la COVID-19, l'intelligence artificielle pourrait fortement faire bouger les choses dans les années, voire les semaines à venir. La possibilité de lutter contre les écarts injustifiés de qualité des soins est particulièrement prometteuse, tout comme celle de réduire les erreurs médicales évitables, les inégalités en matière de santé et de soins, ainsi que l'inefficacité et le gaspillage. L'IA pourrait offrir des avantages considérables, non seulement dans le cadre du maintien du statu quo, mais également pour améliorer la résilience et la préparation aux situations d'urgence, rendant les systèmes de santé et les sociétés plus aptes à répondre à des épidémies comme celle de COVID-19 (OCDE, 2020).

Agriculture

Les ressources alimentaires sont un élément indispensable à la vie humaine. La population mondiale devrait cependant atteindre 10 milliards d'habitants d'ici à 2050, alors que la dégradation de l'environnement provoquée par les changements climatiques accentue toujours plus la pression exercée sur les systèmes agricoles actuels. L'intégration de l'IA pour la collecte de mégadonnées agricoles par des réseaux de capteurs sur site, des satellites et des

drones a permis de relever les défis les plus urgents. L'intelligence artificielle permet l'analyse des données à l'échelle mondiale et à l'échelle locale en temps réel afin d'en tirer des informations utiles au sujet des cultures, des caractéristiques du sol et des conditions météorologiques pour aider les agriculteurs à prendre des décisions. Elle permet de transformer l'agriculture en passant de la personnalisation de masse des services agricoles à l'agriculture de précision ou numérique. Elle favorise notamment la hausse de la productivité grâce à l'utilisation précise d'engrais et de pesticides, ainsi qu'à celle raisonnée des ressources naturelles et à l'adoption de mesures d'économie d'eau (di Vaio *et al.*, 2020 ; Sheikh *et al.*, 2020 ; Patricio et Rieder, 2020 ; Viani *et al.*, 2017 ; Paucar *et al.*, 2015).

Il convient d'observer que les différentes régions du monde auront des besoins et des exigences particuliers pour la mise au point et l'instauration de solutions ponctuelles basées sur l'IA. À titre d'exemple, 80 % des agriculteurs d'Afrique subsaharienne sont des petits exploitants qui disposent de ressources limitées. Il existe par conséquent un besoin de technologies à faible coût basées sur l'IA que les agriculteurs peuvent rapidement adopter et adapter à leur situation.

Transports

Les systèmes de transport sont des infrastructures clés jouant un rôle de passerelle entre les activités sociales et économiques. Le recours à l'intelligence artificielle permet aux transports de devenir progressivement des systèmes intelligents, résistants et à faible émission de carbone. Ces dernières années, on a pu constater la multiplication de l'utilisation d'applications basées sur l'intelligence artificielle dans le domaine des transports, notamment pour la fusion et l'extraction de données relatives à la circulation, la prévision de la circulation, la détection des incidents, la connexion des véhicules et des routes ainsi que le contrôle et la gestion de la circulation en situation d'urgence. Dans le contexte du développement rapide de la puissance de calcul informatique et de l'interconnectivité alimentée par la 5G, les systèmes de transport intelligents cesseront de se situer au niveau de la construction d'infrastructures pour atteindre dans un avenir proche celui d'une gestion et d'un contrôle authentiques et intelligents.

Par exemple, grâce à l'IA, le City Brain d'Alibaba analyse en temps réel des informations (vidéos des caméras aux carrefours et données GPS relatives à l'emplacement des véhicules) tout en gérant la coordination de plus de 1 000 panneaux de signalisation dans la ville et aux alentours de Hangzhou, en Chine, dans le but d'empêcher ou d'atténuer les embouteillages et de prévoir avec précision la circulation grâce à des itinéraires déterminés en fonction des conditions. Cela a permis à cette métropole de 7 millions d'habitants de passer du 5^e rang des villes les plus engorgées de Chine au 57^e rang (Toh et Erasmus, 2019).

Production industrielle

L'intelligence artificielle aide le secteur industriel à faire évoluer ses activités, à mieux servir ses clients et à offrir de nouvelles opportunités à ses employés. La plateforme de Schneider Electric s'appuie sur les outils d'IA de Microsoft afin d'aider une partie de ses clients à

anticiper les problèmes de maintenance. Cela va des torréfacteurs dans les pays développés aux écoles et aux cliniques dans les pays en développement. Au Nigéria, les données historiques ont permis au système d'IA d'apprendre à repérer les éventuelles baisses d'électricité générée par un panneau solaire et à émettre un avertissement lorsqu'un nettoyage est nécessaire ou que l'état d'une batterie doit être contrôlé dans un délai de douze heures pour anticiper une panne. De cette façon, Schneider peut déterminer les tendances de fonctionnement de ses panneaux solaires de manière à ce que ses techniciens anticipent les pannes et évitent les coupures.

Énergie

À la demande de clients, l'intelligence artificielle a été utilisée avec succès avec des systèmes d'énergie renouvelable pour permettre une adaptation plus efficace à des conditions de travail telles que l'intensité de la lumière et du vent. Cela peut également faciliter le respect de l'environnement par les fournisseurs d'énergie traditionnels.

Les données et l'informatique permettent de visualiser les couches du sol, de séquencer l'ADN et par conséquent de rendre le forage plus précis, réduisant non seulement le nombre de puits à forer, mais optimisant également la durée de vie des puits. Tout cela permet de réduire le laps de temps entre l'acquisition du site et la commercialisation de l'énergie (Shaw, 2019).

Défis en matière de technologies d'intelligence artificielle et de gouvernance

Malgré les progrès importants réalisés dans les technologies d'intelligence artificielle, ces dernières en sont encore à un stade initial et se limitent globalement à la résolution de problèmes spécifiques – principalement dans les régions développées – sans atteindre leur vrai potentiel. Il existe donc un écart important entre leurs capacités techniques et applicables et la satisfaction des exigences pour atteindre les Objectifs de développement durable.

Parmi les nombreux problèmes relevés, les algorithmes d'apprentissage approfondi qui sont largement utilisés sont de loin des « boîtes noires » qui n'expliquent pas leurs prédictions d'une manière compréhensible pour l'homme. Le manque de transparence et de responsabilité des modèles prédictifs peut avoir (et a déjà) de graves conséquences. De plus, ce cycle d'intelligence artificielle repose fortement sur des données dont l'étiquetage nécessite une main-d'œuvre importante et une puissance de calcul exponentielle consommant beaucoup d'énergie. En 2019, la demande mondiale d'électricité pour les centres de données était d'environ 200 TWh, soit environ 0,8 % de la demande mondiale d'électricité totale (IEA/AIE, 2020).

En plus des lacunes techniques, il existe également des différences entre les applications d'intelligence artificielle et les attentes de la société, ce qui suscite l'inquiétude du public quant aux éventuels impacts négatifs de cette technologie, tels que la perte d'emploi,

les violations de la vie privée, les préjugés, l'utilisation malveillante et la possibilité d'exacerber la fracture et l'inégalité numériques.

Il est nécessaire de mener des recherches techniques intensives et de développer la gouvernance de l'intelligence artificielle en collaboration avec les gouvernements, la société civile et l'industrie dans l'optique de combler ces différences. Nous devons reconnaître les lacunes des technologies d'intelligence artificielle actuelles et de la réglementation, de la normalisation et de l'éducation qui en dépendent, et prendre conscience de la nécessité de mettre au point cette technologie de manière responsable pour le bien de l'humanité et de l'environnement. De nombreux efforts ont été faits, non seulement en matière de recherche et de développement technique intensif, mais également au sujet de la nécessité de gouvernance. À ce jour, un certain nombre de lignes directrices pour une conduite responsable relative à l'intelligence artificielle ont été proposées par les gouvernements, l'industrie, les universités et les communautés scientifiques et techniques, telles que les initiatives des Nations Unies sur l'éthique en matière d'intelligence artificielle (UNESCO, 2020), les Lignes directrices en matière d'éthique pour une intelligence artificielle digne de confiance de l'UE (GEHN IA, 2019), les Principes de l'OCDE relatifs à l'intelligence artificielle (OCDE, 2019), les Principes de la FMOI pour la promotion d'une conduite responsable des mégadonnées et de l'innovation et de l'application de l'intelligence artificielle en ingénierie (FMOI, 2019), et la Charte OpenAI (OpenAI, 2018).

Recommandations

Un certain nombre de recommandations peuvent être présentées aux gouvernements, aux décideurs politiques, aux industries, aux universités, à la société civile, entre autres, de manière à accélérer le développement de l'intelligence artificielle avec des valeurs humaines pour le développement durable, comme présenté ci-dessous.

1. Promotion de la coopération internationale et interdisciplinaire entre les institutions académiques, les universités, l'industrie et la société civile à l'échelle mondiale, et progrès de l'innovation et des applications de l'IA pour la mise en œuvre des Objectifs de développement durable.
2. Promotion du dialogue à l'échelle internationale afin de parvenir à un consensus mondial sur la gouvernance de l'intelligence artificielle et adoption de principes, de lignes directrices et de normes internationales pour son usage responsable.
3. Promotion de l'éducation et de l'alphabétisation grâce à l'intelligence artificielle afin d'aider les populations à s'adapter à l'ère de l'intelligence artificielle, les ingénieurs à mettre au point des applications et des innovations responsables, et tous les acteurs, en particulier les chefs d'entreprise et les décideurs, à prendre des décisions en connaissance de cause, en déployant des efforts spécifiques visant à réduire la fracture numérique entre les pays riches et les pays pauvres et en s'assurant que les bénéfices puissent être partagés par tous et « ne laissent personne pour compte. ».

Références

- AIE 2020. Data Centres and Data Transmission Networks. Agence internationale de l'énergie. <https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks>
- CAE. 2019. *Engineering Fronts 2019*. Centre d'études stratégiques, Académie chinoise d'ingénierie. <http://devp-service.oss-cn-beijing.aliyuncs.com/f0f94d402c8e4435a17e109e5fbbafe2.pdf>
- CNUCED. 2017. *Rapport sur l'économie de l'information, 2017*. Conférence des Nations Unies sur le commerce et le développement. https://unctad.org/system/files/official-document/ier2017_fr.pdf
- Di Vaio, A. Boccia, F. Landriani, L., Palladino, R. 2020. « *Artificial Intelligence in the agri-food system: Rethinking sustainable business models in the COVID-19 scenario* ». Sustainability, vol. 12, 4851.
- FMOI. 2019. Promoting responsible conduct of Big Data and AI innovation and application in Engineering. Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs. <http://www.wfeo.org/big-data-and-ai-principles-in-engineering/>
- GEHN IA. 2019. Ethics guidelines for trustworthy AI. Commission européenne. Groupe d'experts de haut niveau sur l'intelligence artificielle de la Commission européenne. <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/ethics-guidelines-trustworthy-ai>
- Hawking, S. 2017. Guiding AI to Benefit Humanity and the Environment. Conférence mondiale sur l'Internet mobile (GMIC), Beijing. https://www.youtube.com/watch?v=safbVgs_bZ8
- McKinsey. 2018. Notes from the AI frontier: Modeling the impact of AI on the world economy. McKinsey Global Institute. <https://www.mckinsey.com/featured-insights/artificial-intelligence/notes-from-the-ai-frontier-modeling-the-impact-of-ai-on-the-world-economy>
- OCDE. 2016. *Science, Technology and Innovation Outlook 2016*. Paris, Organisation de coopération et de développement économiques. https://read.oecd-ilibrary.org/science-and-technology/oecd-science-technology-and-innovation-outlook-2016_sti_in_outlook-2016-en#page1
- OCDE. 2019. *OECD Principles on AI. Organisation de coopération et de développement économiques*. <https://www.oecd.org/going-digital/ai/principles>
- OCDE. 2020. *Trustworthy AI in Health*. Background paper for the G20 AI Dialogue, Digital Economy Taskforce, 1-2 April, Saudi Arabia. <https://www.oecd.org/health/trustworthy-artificial-intelligence-in-health.pdf>
- OpenAI. 2018. OpenAI Charter. <https://openai.com/charter/>
- Patrício, D.I. Et Rieder, R. 2018. Computer vision and artificial intelligence in precision agriculture for grain crops: A systematic review. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 153, pp. 69 - 81.
- Paucar, L.G., Diaz, A.R., Viani, F., Robol, F. Polo, A. et Massa, A. 2015. Decision support for smart irrigation by means of wireless distributed sensors. *15^e symposium méditerranéen sur les micro-ondes de l'IEEE*, IEEE de Lecce, pp. 1 - 4.
- Schwab, K. 2017. *La quatrième révolution industrielle*. New York, Crown Publishing Group.
- Shaw. G. 2019. The Future Computed: AI & Manufacturing. *Microsoft Corporation*. <https://news.microsoft.com/futurecomputed/>
- Sheikh J.A., Cheema S.M., Ali, M., Amjad Z., Tariq J.Z., et Naz, A. 2020. IoT and AI in precision agriculture: Designing smart system to support illiterate farmers. *Advances in Artificial Intelligence, Software and Systems Engineering*. Ahram, T. (dir.publ.) AHFE 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 1213. Springer, Cham.
- Toh, M. et Erasmus, L. 2019. Alibaba's « City Brain » is slashing congestion in its hometown. *CNN Business*, 15 janvier 2019. <https://edition.cnn.com/2019/01/15/tech/alibaba-city-brain-hangzhou/index.html>
- UNESCO. 2019. Semaine de l'apprentissage mobile : l'intelligence artificielle pour le développement durable. Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture. <https://en.unesco.org/sites/default/files/mlw2019-programme-fr.pdf>
- UNESCO. 2020. UN System wide consultation on Ethics of AI. Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture. <https://en.unesco.org/news/system-wide-consultation-ethics-ai>
- Viani, F. Bertoli, M. Salucci, M., Polo, A. 2017. Low-cost wireless monitoring and decision support for water saving in agriculture. *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, n° 13, pp. 4299 - 4309.
- Vinuesa, R., Azizpour, H., Leite, I. et al. 2020. Le rôle de l'intelligence artificielle dans la réalisation des Objectifs de développement durable. *Nature Communications*, vol. 11, n° 233.

Ajeya Bandyopadhyay⁴²

3.9 INGÉNIERIE POUR DES VILLES INTELLIGENTES



tostphoto/Shutterstock.com

42 Comité de l'information et de la communication de la FMOI, Inde.

Introduction

Les villes du monde entier sont confrontées à des défis considérables, tels que l'augmentation des embouteillages, la détérioration de la qualité de l'air, l'insuffisance d'eau, l'absence de traitement et de gestion adaptés des déchets, mais aussi à des problèmes de santé publique, à la hausse du taux de criminalité, etc. Dans le même temps, on s'attend à ce que les villes accueillent 70 % de la population mondiale et contribuent à 85 % de la production économique mondiale d'ici à 2050, ce qui pourrait avoir une incidence énorme sur l'environnement (ONU, 2019).

Pour relever ces défis, les municipalités se sont rapidement mises à adopter des technologies intelligentes et des applications d'ingénierie avancée afin de proposer des services urbains plus rapides, fiables et abordables. La mise en œuvre rapide de technologies numériques et d'ingénierie altère la nature et l'économie des infrastructures, ce qui constitue un élément indispensable afin de relever ces défis urbains. D'une certaine manière, cela offre également d'énormes possibilités

d'innovation et de mise au point d'applications rentables aux futurs ingénieurs et technologues dans l'optique d'un développement global des villes et d'une amélioration de la qualité de vie en ville. Le *Rapport mondial sur le développement durable 2019* cible également le développement urbain comme un point d'entrée essentiel à la mise en œuvre intégrée des Objectifs de développement durable.

À titre d'exemple, le tableau 1 présente quelques domaines dans lesquels les applications de technologies avancées transforment les infrastructures et les services urbains. La création de services personnalisés en fonction de chaque citoyen a des répercussions importantes sur le plan social, environnemental et économique. Dans l'ensemble, ces services aident les villes et les régions à respecter leurs engagements vis-à-vis des Objectifs de développement durable, en particulier de l'Objectif 11, relatif aux villes et aux communautés durables.

Tableau 1. Exemples d'applications technologiques dans les villes intelligentes avec de fortes répercussions sur les ODD dans les pays en développement, qui améliorent les indicateurs clés de la qualité de vie

| Domaine | Technologie/applications d'ingénierie | Effet |
|--|--|---|
| Déplacements plus rapides, sûrs et abordables | <ul style="list-style-type: none"> Utilisation de l'affichage numérique et des applications mobiles Gestion intelligente de la circulation Tarification des encombrements Information en temps réel Maintenance préventive des infrastructures de transport Véhicules autonomes | <ul style="list-style-type: none"> Réduction du temps de trajet de 15 à 20 % Réduction du temps de trajet pour se rendre au travail dans le secteur de la santé ou de l'administration de 45 à 60 % |
| Réaction des services de santé publique plus intelligente et plus rapide | <ul style="list-style-type: none"> Systèmes de suivi des patients à distance Utilisation de systèmes de suivi des maladies infectieuses | <ul style="list-style-type: none"> Réduction des frais de santé de plus de 4 % Réduction de 5 % de la propagation des maladies infectieuses dans les villes des pays en développement |
| Environnement plus propre et plus durable | <ul style="list-style-type: none"> Systèmes d'automatisation des bâtiments Surveillance de la qualité de l'air Suivi de la consommation d'eau grâce à des compteurs, des capteurs et des analyses avancés Systèmes intelligents de gestion des déchets Économie circulaire pour la réduction/réutilisation/recyclage des déchets avec la création d'une valeur économique | <ul style="list-style-type: none"> Réduction de 6 % des émissions des bâtiments Réduction de 3 à 15 % des effets négatifs de la pollution atmosphérique sur la santé Réduction de la consommation d'eau de 15 % et des pertes en eau de 25 % Réduction des déchets solides non recyclés de 30 à 130 kg/personne |
| Accès plus intelligent, abordable et durable à l'énergie | <ul style="list-style-type: none"> Réduction de la consommation/répartition de la charge vers les périodes creuses Compteurs intelligents pour réduire les pertes, les vols, une meilleure prévision de la demande et de la charge | <ul style="list-style-type: none"> Réduction de l'utilisation des « centrales de pointe » à fortes émissions de carbone Utilisation accrue de l'énergie verte Réduction des pannes de courant |
| Amélioration de la sécurité publique et de la sécurité de l'information | <ul style="list-style-type: none"> Prévision policière, cartographie de la criminalité en temps réel et détection des coups de feu Répartition optimisée et synchronisation des feux de circulation Services de taxis basés sur la géolocalisation et réduction des cas de conduite en état d'ébriété | <ul style="list-style-type: none"> Diminution de 30 à 40 % des agressions, des vols et des cambriolages Réduction de 20 à 35 % des délais d'intervention en cas d'urgence Réduction de plus de 1 % du nombre de victimes d'accidents de la route |
| Innovation et opportunités économiques | <ul style="list-style-type: none"> Les technologies intelligentes peuvent contribuer à rendre les marchés du travail locaux plus efficaces, à soutenir la croissance des entreprises locales et à développer des compétences pour faciliter l'emploi de la population | <ul style="list-style-type: none"> Stimulation de l'emploi de 1 à 3 % d'ici à 2025 par les technologies des villes intelligentes |
| Infrastructures et applications résilientes aux catastrophes | <ul style="list-style-type: none"> Systèmes d'alerte rapide Renforcement des équipements civiques urbains par rapport aux catastrophes Mécanismes de récupération et de réponse plus rapides en cas de catastrophe | <ul style="list-style-type: none"> Réduction de l'impact des catastrophes Réduction des pertes économiques, environnementales et humaines Durabilité des infrastructures |

Source : McKinsey Global Institute, 2018.

Le taux d'adoption des technologies numériques et des solutions informatiques est plus rapide dans les villes des économies émergentes. Des solutions centrées sur les citoyens et sur l'analyse de mégadonnées sont mises en place rapidement dans les villes intelligentes en raison de la quantité importante d'infrastructures dépendant de capteurs. L'écosystème de l'Internet des objets fournit la plateforme adéquate pour gérer et surveiller les services urbains modernes. Cet écosystème constitue l'élément central de la majorité de ces solutions intelligentes, qui offre aux villes intelligentes la possibilité d'adopter des technologies prédictives. Ces dernières permettent d'améliorer l'efficacité de plusieurs services urbains et la qualité de vie de leurs habitants par la création d'un réseau interconnecté de machines et de capteurs capables de transmettre des messages, ce qui entraîne l'automatisation de plusieurs tâches répétitives.

Potentiel des technologies numériques et des applications d'ingénierie avancées pour transformer les villes intelligentes

Grâce à l'utilisation efficace de l'Internet des objets, une ville intelligente peut optimiser ses ressources publiques en améliorant la qualité de la prestation de services pour des dépenses réduites. La fourniture d'un accès facile et unique aux ressources publiques afin de permettre une meilleure utilisation et une optimisation de la surveillance des transports, de l'eau, de l'électricité et de l'entretien des zones publiques constitue l'un des objectifs principaux de l'utilisation de l'Internet des objets dans les villes intelligentes. Le concept de ces villes est mis en place dans l'optique d'accroître la transparence des actions entreprises par les municipalités tout en répondant aux besoins du public. Ci-dessous, voici quelques exemples d'applications basées sur l'Internet des objets et mises en œuvre dans certaines villes intelligentes.

- **Santé intelligente.** Les capteurs ont permis aux machines de contrôles de santé d'améliorer les diagnostics de santé de base. À Glasgow, des capteurs sont placés dans des logements pour diagnostiquer et contrôler les problèmes de santé, ainsi que pour fournir un diagnostic précoce.
- **Gestion intelligente de la circulation.** La gestion adaptative de la circulation basée sur une modélisation dynamique à l'aide de données en temps réel provenant de caméras équipées de détecteurs de circulation a contribué à anticiper les embouteillages. À Barcelone, par exemple, des bus intelligents sont connectés au réseau Internet de la ville et affichent en temps réel les horaires des bus, des informations touristiques, des cartes des itinéraires et des mises à jour relatives aux embouteillages.

- **Réseaux intelligents d'alimentation énergétique.** À Singapour, l'installation de capteurs et d'outils d'analyse dans le réseau d'eau permet au fournisseur d'effectuer un suivi en temps réel et de disposer d'un système d'aide à la décision, rendant ainsi l'eau disponible 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7 pour les consommateurs.
- **Compteurs intelligents.** Relevés automatisés des compteurs et transmission des données de consommation des services publics aux consommateurs et aux services concernés pour un suivi et une facturation à distance quasiment en temps réel. Nairobi a installé 90 000 compteurs intelligents dans l'optique de lutter contre le vol d'eau.
- **Stationnement intelligent.** Dans la ville de Calcutta, les patrouilles routières de la ville ont lancé une application mobile qui fournit aux conducteurs des mises à jour en temps réel sur les places de stationnement disponibles dans la ville, permettant aux conducteurs de les réserver.
- **Ramassage intelligent des déchets et économie circulaire.** La surveillance des conteneurs de déchets permet d'évaluer les niveaux d'utilisation et de remplissage afin de tirer le meilleur parti du calendrier et des itinéraires de collecte des déchets. Par exemple, à Prague, des poubelles intelligentes ont été installées dans le cadre des plans de gestion des déchets, de manière à économiser de l'énergie et de l'argent. Ces poubelles intelligentes étaient dotées de capteurs qui transmettaient aux autorités des données sur leur niveau de remplissage.
- **Éclairage intelligent.** À Copenhague, le programme de gestion à distance de l'éclairage a permis de réaliser 65 % d'économies d'énergie en contrôlant l'intensité des lampadaires lorsque la lumière n'est pas nécessaire.

Outre les applications énumérées ci-dessus, il existe plusieurs autres domaines dans lesquels l'Internet des objets aide les villes à fonctionner efficacement et à améliorer la qualité de vie de leurs citoyens. La figure 1 présente plusieurs autres applications de l'Internet des objets dans les villes intelligentes.

Figure 1. Nouvelles applications d'ingénierie dans les domaines pertinents des villes intelligentes



Nouvelles applications et compétences en ingénierie pour les villes intelligentes

Les municipalités et les autorités locales élaborent leurs plans de ville intelligente et exploitent diverses technologies numériques pour mettre en œuvre leur stratégie globale et relever les défis opérationnels et communautaires auxquels ils sont confrontés. Les applications de l'Internet des objets devraient rendre les services urbains plus rapides, efficaces et abordables, et devenir le vecteur du développement économique dans les futures villes intelligentes. Quelques exemples de ces applications technologiques sont donnés ci-dessous.

- **L'Internet mobile** est l'infrastructure numérique fondamentale de l'Internet des objets, et permet aux machines de communiquer et de s'automatiser. Avec l'avènement de la 5G et de plusieurs autres technologies sans fil à courte portée, l'Internet mobile devrait favoriser la mise en œuvre de l'Internet des objets dans les villes intelligentes.

- **L'apprentissage automatique et l'intelligence artificielle** peuvent contribuer à convertir un grand volume de données collectées par les machines en informations exploitables.
- **La cybersécurité** favorise la confiance en permettant un échange sécurisé de données.
- L'avènement de **l'informatique de pointe** permet aux machines de prendre des décisions et de réagir plus rapidement. Cela a permis l'application de l'Internet des objets dans des domaines tels que l'alerte et la réaction en cas d'accident, le suivi et la surveillance de la santé.
- **L'analyse prédictive** sert d'outil proactif pour améliorer l'efficacité et la productivité des entreprises, ainsi qu'une multitude d'actions gouvernementales, comme les prévisions météorologiques, les embouteillages, l'intensité de la pollution, etc. Des algorithmes et des techniques statistiques améliorés constituent l'épine dorsale du système d'information et de renseignement en temps réel basé sur l'Internet des objets et utilisé dans de nombreux services fournis aux citoyens.

- **L'informatique cognitive** permet d'améliorer l'expérience de l'Internet des objets en utilisant des modèles informatisés pour simuler le processus de la pensée humaine dans des situations complexes, améliorant ainsi l'intelligence des dispositifs intelligents. On s'attend à ce que la prochaine dynamique économique de l'Internet des objets provienne de l'intelligence artificielle.
- **La culture numérique** aide un plus grand nombre de personnes à se familiariser avec la technologie, ainsi qu'à améliorer leur connaissance des machines intelligentes et leur taux d'adoption.
- **Les plateformes de l'Internet des objets** permettent la fourniture d'applications dédiées et la gestion des appareils à un coût et dans des délais rapidement réduits. Ces plateformes offrent un large éventail de fonctionnalités aux appareils embarqués pour les connecter de manière sécurisée et gérer l'échange de données.
- **Ingénierie robotique.** Cette discipline est une branche interdisciplinaire de l'ingénierie électrique et mécanique et, avec l'augmentation des machines intelligentes, elle constitue un domaine d'avenir et peut-être l'un des plus importants pour permettre une transition en douceur vers la ville intelligente
- **Ingénierie informatique.** Cette filière d'ingénierie est importante pour le développement de l'Internet des objets et d'autres applications informatiques, telles que la conception de la réalité virtuelle, la science relative à l'informatique en nuage ou la cybersécurité, entre autres.
- **Ingénierie des structures, de l'environnement et de la corrosion.** Une intégration de ces disciplines sera nécessaire pour garantir le respect de l'environnement et la résistance aux catastrophes de la construction et des matériaux de construction. En outre, les villes devront être plus résistantes au climat, ce qui exigera des urbanistes et des ingénieurs, qui ont les compétences et l'expertise suffisantes, de prévoir ses effets en utilisant des modèles climatiques afin d'adopter des normes de conception destinées à réduire la vulnérabilité climatique des infrastructures de la ville.
- **Autres domaines.** Il s'agit notamment de la nano-ingénierie, de l'ingénierie des matériaux/moléculaire, de la biotechnologie/ de l'ingénierie biomédicale, de l'ingénierie de la corrosion et de la mécatronique, qui prennent également de plus en plus d'importance chaque jour.

On estime que le marché mondial de l'Internet des objets consacré aux villes intelligentes, dont la valeur était chiffrée à 79,3 milliards de dollars des États-Unis en 2018, atteindra 330,1 milliards d'ici à 2025 avec un taux composé de croissance annuelle (TCCA) d'environ 22 % (Zion Market Research, 2019). Il s'agit d'un indicateur clair de l'ampleur du jeu pour les entreprises, les institutions et les réseaux de technologie et d'ingénierie, ainsi que pour les ingénieurs dans ce domaine.

Les ingénieurs et les technologues dotés d'ensembles de compétences préparés joueront un rôle essentiel dans cet avenir technologique. Si les nouvelles compétences et l'expertise dans les disciplines spécialisées de l'ingénierie sont importantes, dans le cadre d'une ville intelligente, l'aspect le plus crucial du rôle de l'ingénieur sera en général d'intégrer, de coordonner et de synthétiser les capacités avancées de plusieurs domaines en vue d'élaborer des solutions globales aux problèmes et aux questions des citoyens. Dans le contexte des villes intelligentes et du futur, certains des domaines émergents, dans lesquels les ingénieurs et les praticiens traditionnels peuvent avoir besoin d'un perfectionnement rapide, sont présentés ci-dessous.

- **Ingénierie énergétique.** À mesure que la pénétration des énergies renouvelables augmentera, l'expertise en matière de compréhension de l'intégration et de la stabilité du réseau deviendra extrêmement importante. En outre, avec la hausse du nombre de véhicules électriques dans le système, une compréhension approfondie des techniques d'équilibrage du réseau et des pratiques opérationnelles sera essentielle.
- **Ingénierie civile et urbanisme.** Avec l'apparition de modes de transport public plus efficaces comme le bus à haut niveau de service (BHNS) ou le transport en commun rapide dans le secteur des transports, les ingénieurs civils ainsi que les responsables des transports et de l'urbanisme devront collaborer afin de mettre en place les villes intelligentes.

Compte tenu de l'ampleur et de la complexité des défis auxquels sont confrontées les villes modernes, la mise au point de solutions appropriées et efficaces nécessitera une réflexion multidisciplinaire au niveau systémique. C'est à ce niveau que les ingénieurs et les technologues doivent de plus en plus collaborer et s'engager avec un groupe diversifié d'experts et de professionnels, non seulement en matière de coopération interdisciplinaire dans le domaine de l'ingénierie, mais aussi avec les parties prenantes étrangères à leur domaine, telles que les décideurs politiques, les régulateurs, les professionnels de la finance, les économistes, les sociologues, les environnementalistes et autres, afin de développer des solutions plus pratiques, prêtes à l'emploi, abordables et faciles à mettre en œuvre pour résoudre les problèmes de la ville.

Défis freinant l'adoption de l'Internet des objets dans les villes intelligentes

En dépit des nombreux avantages offerts par l'Internet des objets, les technologies numériques et les applications d'ingénierie avancées dans l'amélioration des atouts sociaux, économiques et environnementaux d'une ville, quelques défis empêchant actuellement l'adoption à grande échelle et transparente de ces technologies subsistent, notamment les suivants :

- **Manque de ressources adaptées.** Il n'est pas évident de fabriquer partout les composants utilisés pour l'Internet des objets et les dispositifs numériques (comme les microprocesseurs, les puces, les cartes de circuits imprimés). Le manque de disponibilité de matières premières telles que le lithium et les métaux lourds des terres rares pose d'autres problèmes en ce qui concerne la fabrication de dispositifs pour cette technologie.
- **Sécurité et confidentialité des données.** La forte dépendance des dispositifs de l'Internet des objets à l'égard d'Internet expose les utilisateurs au risque de cyberattaques, qui pourraient entraîner une perte de données et de vie privée, mais aussi des pertes financières. Il convient de répondre à cette préoccupation en renforçant la cybersécurité sur l'ensemble de ces dispositifs. Il est également important que les gouvernements établissent le plus tôt possible les conditions de gouvernance des données en matière de propriété, de respect de la vie privée, d'utilisation et de partage en tant qu'élément central de la sécurité des données.
- **Contraintes de capacité des organes de gouvernance.** Le rythme auquel la technologie évolue dépasse de loin la capacité des gouvernements à divers niveaux à formuler des politiques et un cadre de gouvernance pour soutenir, réglementer et surveiller les applications technologiques. Les organes de gouvernance manquent souvent de savoir-faire technique, de force institutionnelle, de flexibilité et de ressources humaines pour mettre régulièrement à jour le cadre politique en fonction des avancées technologiques.
- **Aggravation des inégalités à travers le monde.** Alors que certaines villes ont été en mesure de franchir un palier et d'adopter des solutions technologiques avancées pour servir leurs citoyens, une grande majorité de villes dans le monde ont encore du mal à fournir des infrastructures de base et des installations de sécurité, de sûreté et d'hygiène à leurs citoyens. Cette inégalité mondiale croissante empêche les autorités municipales d'accéder aux ressources nécessaires pour mettre en œuvre des technologies modernes.
- **Pertes d'emplois.** Les technologies numériques entraînent souvent le remplacement de plusieurs emplois bas de gamme et répétitifs comme la gestion de la circulation, la collecte des déchets, etc. Cependant, dans de nombreuses villes, cela entraînerait des pertes d'emplois à grande échelle, car ces activités sont manuelles et offrent une source de revenus à des milliers de personnes qui ne sont pas nécessairement assez qualifiées pour exercer d'autres activités. Les gouvernements du monde entier ont lancé divers programmes de reconversion et de perfectionnement afin d'atténuer l'impact négatif à court terme sur les moyens de subsistance de leurs citoyens.
- **Reconversion de la main-d'œuvre.** Le manque de compétences dans tous les secteurs d'activité est appelé à se creuser au cours de la quatrième révolution industrielle. Les progrès rapides de l'intelligence artificielle, de la robotique et d'autres

technologies émergentes se produisent selon des cycles de plus en plus courts et modifient la nature même des emplois et des compétences nécessaires pour les réaliser. La disponibilité de travailleurs qualifiés sur les marchés locaux sera un facteur clé pour déterminer la réussite de la mise en œuvre des interventions technologiques.

Malgré les défis à relever, on s'attend à ce que la croissance de l'économie mondiale et le renforcement du capital humain amènent de plus en plus de villes dans le monde à se tourner vers des solutions technologiques de manière à répondre aux besoins de leurs citoyens.

La voie à suivre

L'application de l'Internet des objets dans les villes intelligentes ne se limite pas à l'utilisation d'une technologie robuste, elle couvre également l'aspect social lié à sa facilité d'utilisation, à son utilité et à l'équité numérique qui permettra une plus grande acceptabilité et une meilleure efficacité au sein des villes. Néanmoins, pour que ces technologies et applications d'ingénierie soient couronnées de succès dans les villes intelligentes, elles doivent respecter certaines caractéristiques et certains principes. Ces principes, évoqués dans les recommandations, sont également importants pour l'alignement à venir des compétences en ingénierie de manière à permettre aux ingénieurs de jouer un rôle plus important, plus large et plus responsable dans les villes intelligentes et du futur.

Les plateformes mondiales joueront également un rôle essentiel dans la coordination et la canalisation des efforts internationaux publics et privés en faveur de l'adoption, de la pénétration et de la gouvernance des technologies dans les villes intelligentes. Les parties prenantes multisectorielles, notamment les partenaires techniques, financiers, politiques, sociaux et commerciaux, peuvent collaborer et coordonner leurs efforts par l'intermédiaire de ces plateformes. Cela permettrait aussi une compréhension commune, l'établissement de relations et la génération d'engagements en faveur de nouvelles approches et de nouveaux partenariats comme pilier des avancées technologiques urbaines.

Les villes intelligentes donnent l'opportunité d'intégrer les technologies numériques avec une multitude d'applications d'ingénierie afin de créer des services efficaces destinés aux citoyens, de répondre à leurs questions et de résoudre leurs problèmes. Elles offrent également la possibilité de combiner de multiples applications technologiques et d'ingénierie pour trouver une solution commune à un problème. Compte tenu du rôle primordial joué par les technologies numériques, des données plus complètes et en temps réel seront rendues disponibles, ce qui permettra aux agences et aux parties prenantes de suivre le déroulement des événements, de comprendre comment les modèles de demande voient le jour et de réagir avec rapidité, souplesse et flexibilité.

Les technologies et les applications de l'ingénierie intelligente modifient la nature et l'économie des infrastructures. De la

nouvelle génération de transports et d'établissements de santé aux infrastructures résistantes aux catastrophes et aux sources d'énergie à faibles émissions de carbone, les villes intelligentes pourraient être le vecteur d'une innovation ciblée et le banc d'essai de nouvelles applications et solutions. Cela ouvrira à son tour de nouvelles portes pour la recherche et le développement en ingénierie ainsi que pour le renforcement de solutions viables sur le plan commercial. Le développement urbain dans son ensemble doit se faire de manière durable, intégrée et inclusive, ce qui oblige les autorités municipales à travailler en collaboration avec les entreprises, les organisations de la société civile, les particuliers et même avec d'autres villes du monde de manière à faciliter l'échange de connaissances et de bonnes pratiques. Il en résulte non seulement une ville plus agréable à vivre, mais aussi plus productive et plus respectueuse de l'environnement, dans laquelle les activités économiques et d'innovation peuvent se développer et prospérer.

Recommandations

- 1. Créativité.** Les organes directeurs comme les municipalités doivent choisir avec soin des solutions futuristes ayant recours à des technologies de pointe, tout en restant au fait des normes locales et de l'adoptabilité. Cela nécessiterait un équilibre créatif entre la technologie de pointe, les ressources humaines et le développement des infrastructures urbaines.
- 2. Interconnexion.** Au lieu d'entreprendre un développement en silos, les municipalités devront travailler en collaboration avec divers départements, notamment les transports, l'éducation, les soins de santé, pour permettre le partage des connaissances et des données dans l'optique de créer un réseau de solutions intelligentes interconnectées visant à fournir des services globaux pour servir les citoyens.
- 3. Collaboration.** Le développement de plusieurs modèles de partenariats public-privé (PPP) peut être envisagé pour tirer parti du savoir-faire et des ressources du secteur privé. Les municipalités peuvent également encourager un comportement participatif et équitable, permettant un fort sentiment d'appropriation parmi les citoyens qui utilisent les services d'Internet des objets.
- 4. Certification.** Les services d'Internet des objets et les technologies utilisées peuvent être certifiés (par exemple, ISO⁴³, RGPD⁴⁴, DPO⁴⁵) afin de développer la confiance des utilisateurs et de promouvoir la normalisation. L'obtention de la certification permettrait une utilisation sûre et sécurisée des technologies tout en protégeant la vie privée des citoyens.

43 Site Web officiel de l'Organisation internationale de normalisation : <https://www.iso.org/fr/home.html>

44 Plus d'informations sur le respect du Règlement général sur la protection des données : <https://gdpr.eu>

45 Délégué à la protection des données (DPO, Data protection officer).

Références

- Albino, V., Berardi, U. et Dangelico, R.M. 2015. Smart cities: Definitions, dimensions, and performance. *Journal of Urban Technology*, vol. 22, n° 1, pp. 3 - 21. https://www.researchgate.net/publication/311947485_Smart_Cities_Definitions_Dimensions_Performance_and_Initiatives
- Ericsson. 2017. *Ericsson mobility report*, novembre 2017. <https://www.ericsson.com/49de7e/assets/local/mobility-report/documents/2017/ericsson-mobility-report-november-2017.pdf>
- KPMG. 2019. *Internet of Things in Smart cities*. Exhibitions India Group. <https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/in/pdf/2019/05/urban-transformation-smart-cities-iot.pdf>
- McKinsey Global Institute. 2018. *Smart Cities: Digital Solutions for A More Livable Future*. McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/smart-cities-digital-solutions-for-a-more-livable-future>
- ONU. 2019. *Le futur c'est maintenant. La science au service du développement durable*. Rapport mondial sur le développement durable. New York, Organisation des Nations Unies.
- UIT-CEE 2016. *Shaping smarter and more sustainable cities*. International Telecommunication Union and United Nations Economic Commission for Europe. Genève : CEE. <https://www.unecce.org/info/media/presscurrent-press-h/housing-and-land-management/2016/shaping-smarter-and-more-sustainable-cities-unece-and-itu-launch-the-united-for-smart-sustainable-cities-global-initiative/doc.html>
- Zion Market Research. 2019. Global IoT in smart cities market is anticipated to reach around USD 330.1 billion by 2025. *Zion Market Research*, mars 2019.

4. FORMATION ET RENFORCEMENT DES CAPACITÉS EN INGÉNIERIE POUR LE DÉVELOPPEMENT DURABLE



Résumé. Le chapitre 4 aborde un sujet essentiel de l'ingénierie devant être traité si nous voulons atteindre les Objectifs de développement durable. Des sciences, de la technologie, de l'ingénierie, des mathématiques (STEM) à l'école, en passant par l'enseignement supérieur et le développement professionnel continu (DPC), jusqu'aux possibilités de perfectionnement et de requalification, l'enseignement de l'ingénierie représente une somme de tous ces éléments qui permettent aux ingénieurs actuels de répondre aux défis à venir, et de les doter des outils et des compétences nécessaires pour transformer ce monde dynamique en un lieu respectueux de la planète et en mesure de garantir une bonne santé et un bien-être pour tous. La section 4.1 se concentre sur la manière dont l'enseignement supérieur en ingénierie peut répondre aux exigences de nouvelles compétences en la matière pour le développement durable, et examine les raisons pour lesquelles et les manières dont l'enseignement de l'ingénierie est en train de passer de son orientation traditionnelle vers les connaissances techniques disciplinaires à une approche interdisciplinaire beaucoup plus large et complexe de résolution de problèmes qui combine des analyses de problèmes sociétaux et durables avec des connaissances et des solutions techniques universitaires. La section 4.2 se penche plus en détail sur la nécessité de la formation continue en ingénierie afin de permettre aux

ingénieurs de suivre le développement rapide des technologies et les attentes grandissantes de la société de manière à répondre aux problèmes du monde par l'application de leur discipline. Cette section analyse également l'état actuel de l'apprentissage tout au long de la vie dans le domaine de l'ingénierie, ainsi que les approches futures pour créer un cadre pour les politiques, les infrastructures et l'assurance qualité. La section 4.3 porte sur le développement professionnel continu (DPC) et les systèmes de certification, qui jouent un rôle fondamental dans l'adaptation des ingénieurs aux innovations technologiques et aux nouvelles méthodes de travail pour mieux remplir leurs engagements en matière de développement durable à l'échelle mondiale. Le chapitre 4 montre que le renforcement des capacités des ingénieurs constitue un processus continu et que, parallèlement au développement de la science et de la technologie, les aspects sociaux de l'ingénierie moderne et l'assurance qualité doivent faire partie de chaque étape de ce processus évolutif. L'une des principales exigences de ce long parcours de formation des ingénieurs, des études au développement professionnel, est de « faire en sorte que tous les élèves acquièrent les connaissances et compétences nécessaires pour promouvoir le développement durable » (Objectif de développement durable 4).



Anette Kolmos¹

4.1 ENSEIGNEMENT DES SCIENCES DE L'INGÉNIEUR POUR L'AVENIR



Stock-Asso/Shutterstock.com

¹ Professeur à l'Aalborg Centre for Problem Based Learning in Science, Engineering and Sustainability, Université d'Aalborg, Danemark.

Résumé. L'enseignement des sciences de l'ingénieur joue un rôle crucial dans la formation d'ingénieurs capables de relever les défis découlant de la volonté d'atteindre les ODD. L'enseignement devra subir des changements, en passant d'un accent sur les connaissances techniques académiques à une approche interdisciplinaire beaucoup plus large et complexe de résolution des problèmes, qui combine des analyses de problèmes sociétaux et durables avec des connaissances et des solutions techniques académiques. Les étudiants en ingénierie doivent apprendre à analyser et à résoudre des problèmes compliqués et complexes et à collaborer au sein de diverses équipes. Ce chapitre souligne le besoin de nouvelles compétences en ingénierie, et les nouvelles tendances observées au sein des établissements d'ingénierie pour répondre aux défis par un apprentissage centré sur l'étudiant et axé sur les problèmes. Pour faire évoluer l'enseignement de l'ingénierie dans cette direction, un cap et une recherche pédagogiques seront nécessaires. La modification des programmes d'études doit être envisagée de manière systémique et inclure la mise en avant et le perfectionnement du corps enseignant.

Comment le secteur de l'ingénierie évolue-t-il ?

L'ingénierie est une profession qui repose sur la résolution de problèmes et nécessite une approche de l'apprentissage basée sur les problèmes dès le début de l'école et tout au long du système éducatif. Une approche donnant la part belle à la recherche renforcerait les matières scientifiques à l'école, en parallèle d'une réflexion sur la conception et d'une collaboration interdisciplinaire avec d'autres matières scolaires (encadré 1).

Les étudiants en ingénierie doivent apprendre à analyser et à résoudre les problèmes de la société et à mettre au point des technologies qui amélioreront les modes de vie durables. Ces besoins sont renforcés par les grandes tendances qui façonneront l'enseignement de l'ingénierie à l'avenir, comme les technologies émergentes et le programme d'employabilité, sans oublier les questions de diversité comme le manque de représentation équilibrée des genres.

Encadré 1. Importance de l'enseignement précoce des STEM

La baisse régulière des inscriptions de jeunes dans le domaine scientifique et la pénurie d'ingénieurs sont préoccupantes. L'UNESCO a mis au point des ressources éducatives en ligne dans le domaine des sciences, de la technologie, de l'ingénierie et des mathématiques (STEM) en partenariat avec Intel, disponibles pour l'enseignement à distance inclusif en réponse à la COVID-19. L'enseignement des STEM à domicile n'a jamais été aussi accessible qu'aujourd'hui. Ces ressources en ligne gratuites proposent des défis de codage pour tous les âges, ainsi que des problèmes et des solutions mathématiques, une variété d'expériences pratiques en microscopie, des instructions, des descriptions, des guides, des magazines et des possibilités de conception interactive avec des scientifiques sur Skype. L'objectif est d'intéresser davantage les jeunes, en particulier les filles, aux disciplines de l'ingénierie et des sciences qui stimulent leur esprit critique, l'innovation et la résolution de problèmes. Par exemple, l'UNESCO propose un programme en ligne destiné à améliorer et à renforcer l'enseignement des STEM, en apprenant depuis le départ comment construire et programmer un robot avec des matériaux domestiques et un téléphone intelligent.

Les éducateurs peuvent accéder à un certain nombre d'unités spécialement développées sur les principes des STEM pour la salle de classe en consultant le lien suivant : <http://www.unesco.org/new/fr/natural-sciences/science-technology/engineering/engineering-education/stem-resources>

L'ingénierie et la technologie sont d'une importance vitale pour la réalisation des 17 Objectifs de développement durable, et donc pour l'avenir de la planète. Comme indiqué dans le rapport de l'UNESCO intitulé *Ingénierie : Enjeux et défis pour le développement*, l'enseignement des sciences de l'ingénieur est confronté à un certain nombre de défis, notamment attirer et retenir les étudiants et répondre à l'évolution des modes de production et d'application des connaissances (UNESCO, 2010). L'enseignement des sciences de l'ingénieur est primordial afin de s'attaquer à la majorité de ODD et joue également un rôle essentiel dans le développement humanitaire, social et économique, notamment dans les processus sociaux qui sous-tendent la paix et la justice. L'étude de cas de la Colombie en constitue un exemple (encadré 2). Il est donc important pour l'enseignement des sciences de l'ingénieur de trouver des méthodes de formation des ingénieurs capables d'intégrer des valeurs durables dans le développement technologique.

L'enseignement des sciences de l'ingénieur doit progresser rapidement dans ces domaines, notamment parce que la formation des ingénieurs prend cinq ans. Les étudiants qui commencent aujourd'hui leurs études d'ingénieur mettront leurs connaissances en pratique au-delà de l'horizon fixé pour la réalisation des Objectifs de développement durable. La technologie deviendra plus complexe et les résultats de l'apprentissage pour la formation d'ingénieur devraient suivre, impliquant des changements tant au niveau du contenu de l'enseignement que de la méthode d'apprentissage. L'orientation mise en place à l'avenir devrait impliquer une compréhension intégrée de l'identification et de la résolution de problèmes complexes afin de permettre aux étudiants en sciences de l'ingénieur d'acquérir les compétences techniques et la méthodologie nécessaires pour faire face aux défis du développement durable relatifs à leur discipline et à l'impact sociétal.

Encadré 2. L'enseignement des sciences de l'ingénieur au service du développement durable

L'apprentissage par problèmes et par projets dans l'ingénierie au service de la paix

Le programme PEAMA (*Programa Especial de Admisión y Movilidad Académica*; Programme spécial d'admission et de mobilité académique) de l'Universidad Nacional de Colombia (Bogotá) est un exemple récent de la façon dont les universités publiques et l'enseignement des sciences de l'ingénieur peuvent contribuer aux processus de paix – comme celui que connaît la Colombie après des décennies de conflit interne – et promouvoir l'intégration des populations rurales touchées. L'objectif global du programme est d'augmenter le niveau d'éducation des populations dans les zones rurales et pauvres, et d'améliorer les résultats aux examens d'admission. Le programme sur quatre semestres couvre les domaines des soins infirmiers, de l'ingénierie agricole, de l'ingénierie agronomique, de la médecine vétérinaire et de l'élevage. Dans le cas de PEAMA Sumapaz, l'apprentissage par projet est la principale méthodologie pédagogique. Chaque semestre, les étudiants créent un produit concret offrant une solution aux problèmes affectant ces zones rurales afin de développer des compétences liées à la complexité, la créativité et l'innovation dans l'élaboration de solutions appropriées (Agencia de Noticias UN, 2018; Ordóñez *et al.*, 2017).

situations sont catégorisées comme simples, compliquées, complexes et chaotiques. Dans la catégorie *simple*, le comportement du système est bien compris et les meilleures pratiques sont mises en œuvre; la plupart des disciplines d'ingénierie sont enseignées dans ce domaine. Le domaine *compliqué* nécessite un comportement d'*expert* lorsqu'il existe plusieurs bonnes réponses. Par exemple, la conception d'un pont ou d'un téléphone portable, où quelques nouvelles fonctionnalités s'ajoutent à une technologie connue, entre dans cette catégorie. Les situations *complexes* sont le domaine des nouvelles compétences *émergentes* où la nature du problème n'est pas claire ou le type de solutions à appliquer inconnu. La durabilité rentre dans le domaine du *complexe* et doit définir une série de critères pour analyser et résoudre les problèmes. Les situations *chaotiques*, au-delà de leur complexité, sont souvent le résultat de catastrophes, qu'elles soient naturelles ou d'origine humaine. Des actions immédiates sont nécessaires pour stabiliser la situation avant d'appliquer des méthodes relevant des domaines complexes, compliqués et simples.

Le programme d'ingénierie normal fait partie des domaines *simples* et *compliqués*. Les défis du développement durable, de la quatrième révolution industrielle (société 5.0) et de l'employabilité exigent la possibilité d'acquérir des compétences dans les quatre domaines : 1) chaotique, 2) complexe et émergent, 3) compliqué et 4) simple. La stratégie éducative pour les domaines *compliqués* et *complexes* impliquera l'application de projets de conception ou axés sur les problèmes, qui pourront aller de plus ouverts à moins ouverts, ainsi qu'une variation dans la structure du programme d'études et la pédagogie (figure 1).

ODD et complexité des programmes

La prise en compte des Objectifs de développement durable et des défis en matière de durabilité vont demander des programmes plus axés sur la « complexité ». Le cadre Cynefin est un bon moyen pour comprendre comment les méthodes d'enseignement et d'apprentissage répondent au besoin croissant de compréhension des complexités (Snowden et Boone, 2007). Dans ce cadre, les

Figure 1. Combinaison des éléments de l'élaboration des programmes d'études avec le degré de complexité

| | Type de problème | Connaissances et compétences | Structure du programme d'études | Méthodes d'enseignement et d'apprentissage |
|-----------|--|---|---|---|
| Évident | Problème connu Solution connue par exemple, statique | Disciplines | Sujets/cours | Conférences, apprentissage actif et classe inversée |
| Compliqué | Problème connu, Solution inconnue, par exemple, maison zéro carbone | Multidisciplinaire | Collaboration entre plusieurs disciplines | Projets universitaires basés sur des problèmes dans plusieurs disciplines |
| Complexe | Problèmes inconnus Solution inconnue, par exemple, bâtiments à énergie zéro dans les villes à énergie zéro Nouveaux défis liés à l'Internet des objets, à l'intelligence artificielle, de biotechnologies et de durabilité | Interdisciplinaire | Réorganisation du programme d'études et développement de nouveaux modèles d'apprentissage mixtes et centrés sur l'élève | Analyses de problèmes complexes et projets basés sur des problèmes, dans toutes les disciplines et avec les parties prenantes |
| Chaotique | Catastrophes très complexes | Formation à l'action immédiate par l'apport d'expériences/problèmes issus de situations chaotiques dans l'éducation | | |

Quelles approches pédagogiques se sont avérées efficaces ?

Comment les écoles d'ingénierie s'adaptent-elles à ces défis et quelles tendances émergentes peuvent être identifiées pour les futurs modèles de programmes d'études ? Les établissements d'accréditation répondent à cette question en se référant aux compétences professionnelles identifiées dans l'accord de Washington de l'International Engineering Alliance (IEA), aux critères de l'American Board of Engineering and Technology (ABET) pour la formation des ingénieurs américains, ainsi qu'aux compétences (attributs) des ingénieurs australiens. Certains pays, comme la Suède, réglementent l'éducation au niveau gouvernemental en exigeant explicitement que les étudiants en ingénierie acquièrent des connaissances et des compétences durables (Holgaard *et al.*, 2016).

Au cours des vingt dernières années, les tendances dans les établissements d'enseignement sont passées d'un système dirigé par les enseignants à un environnement d'apprentissage dirigé par les étudiants, ce qui implique :

- L'apprentissage actif en classe (la « classe inversée ») ainsi que l'apprentissage par problème et par projet (APP).
- L'apprentissage lié à la pratique avec l'incorporation dans le programme d'études d'éléments consacrés à de futures situations de travail, comme les stages, les projets industriels, l'entrepreneuriat, les centres d'innovation et l'apprentissage de compétences professionnelles.
- Un nombre croissant d'établissements adoptant une approche plus orientée vers le système, dans laquelle des établissements entiers revoient leur programme d'études au lieu de cours individuels (Graham, 2018b).

La pratique de la classe inversée a été privilégiée, de l'approche de l'apprentissage en ligne à l'enseignement sur campus. Elle combine l'apprentissage en ligne et l'apprentissage sur le campus à des éléments d'apprentissage actif pour faire participer les élèves en classe. L'aspect en ligne prend normalement la forme d'une préparation structurée telle qu'une vidéo, un questionnaire, une lecture ou une activité collaborative avant le cours. Par conséquent, le temps de classe est destiné à des activités et non à la dispensation d'un cours magistral (Jenkins *et al.*, 2017 ; Reidsema *et al.*, 2017). Le plein potentiel de l'apprentissage numérique n'a encore été atteint, et la situation liée à la COVID-19 en 2020 indique un changement plus rapide avec les environnements d'apprentissage mixtes constituant la nouvelle norme.

L'apprentissage par problèmes et par projets (APP) implique un processus d'apprentissage plus complexe où les élèves travaillent en équipe pour identifier les problèmes et choisir les méthodologies pour les résoudre, tout en développant des

prototypes de solutions. En général, les travaux de recherche indiquent que l'APP conduit à une motivation plus forte pour l'apprentissage, à des taux d'abandon moins élevés et à un développement accru des compétences (Dochy *et al.*, 2003 ; Strobel et van Barneveld, 2009). L'APP semble avoir un effet positif sur un autre domaine d'apprentissage : la rétention de connaissances (Norman et Schmidt, 2000 ; Strobel et van Barneveld, 2009). L'APP a également été considéré comme un moyen de combler l'écart entre la formation en ingénierie ou le travail d'ingénieur et le développement des compétences professionnelles (Kolmos *et al.*, 2020b ; Lamb *et al.*, 2010 ; Académie royale d'ingénierie, 2007). Enfin, les résultats de la recherche indiquent que l'APP accroît la sensibilisation des étudiants en ingénierie à la durabilité (Kolmos *et al.*, 2020b ; Servant-Miklos *et al.*, 2020).

Aujourd'hui, la question n'est pas de savoir si l'APP fonctionne. Il est plutôt question d'examiner la qualité de sa mise en œuvre. La pratique varie énormément dans la mise en œuvre de l'apprentissage participatif dans une même matière ou un même cours. Les problèmes présentés dans les projets sont le plus souvent formulés dans un contexte académique, ce que de nombreux auteurs qualifient d'APP basé sur les cours (Chen *et al.*, 2020 ; Gavin, 2011 ; Hadgraft, 2017 ; Kolmos, 2017). L'APP basé sur les cours a ses limites en matière d'apprentissage complexe englobant à la fois la durabilité et les problèmes de la société, mais de tels projets initiés par des universitaires peuvent s'avérer très utiles pour acquérir une compréhension des questions complexes. Une variation des types de problèmes et de projets peut donc constituer une stratégie permettant aux étudiants de travailler sur des défis complexes en matière de durabilité.

Des projets d'équipe plus ouverts et plus longs exigent une approche systémique permettant d'organiser des projets de tailles et de types différents, ainsi que des résultats d'apprentissage (encadré 3). Les problèmes peuvent aller de projets académiques et théoriques à des projets initiés par différents acteurs de la société confrontés à des problèmes concrets. Il s'agit souvent d'un projet étudiant en collaboration avec une entreprise ou un membre de la communauté au sens large, ou d'un projet identifié et formulé par les étudiants eux-mêmes. La collaboration avec les entreprises et les autres intervenants permet aux étudiants de comprendre le type de situations problématiques complexes qu'ils rencontreront au travail. Ces projets initiés de l'extérieur sont souvent très difficiles à contrôler dans le cadre d'un programme académique, car les problèmes peuvent conduire dans des directions non envisagées au départ. Cependant, les recherches indiquent que la motivation augmente dans le cadre de la réalisation de projets d'entreprise, car les étudiants considèrent ces situations d'apprentissage comme plus authentiques et plus excitantes en raison de l'existence d'un client identifiable (Kolmos et de Graaff, 2014 ; Zhou, Kolmos et Nielsen, 2012).

Encadré 3. Types de projets

L'Université d'Aalborg justifie d'une longue expérience en matière d'application d'un modèle cohérent d'apprentissage par problèmes et par projets dans le domaine de l'ingénierie et des sciences. Les étudiants de cette université consacrent la moitié de leur temps d'étude à divers types de projets en équipe et l'autre moitié à des matières plus traditionnelles. Aalborg a constitué une source d'inspiration pour de nombreuses autres institutions dans le monde et a servi de laboratoire vivant pour des méthodes alternatives d'organisation des processus d'apprentissage des étudiants. Les étudiants ont la possibilité d'acquérir des compétences à partir de différents types de projets, allant d'une discipline et de multiprojets, au sujet des résultats d'apprentissage au sein d'une discipline, à des projets interdisciplinaires pour des équipes individuelles, ainsi qu'aux mégaprojets interdisciplinaires de la dernière initiative en collaboration avec plusieurs équipes de projet.

Le mégaprojet aborde les défis de la durabilité et est organisé par thème. Au cours du semestre du printemps 2020, l'un des thèmes abordés était la simplification des modes de vie durables. Plusieurs défis ont été repérés, tels que les déchets, la consommation verte, les transports et la mobilité. Pour chacun de ces défis, d'autres défis et problèmes ont été identifiés, comme le traitement des déchets à l'université d'Aalborg ou les déchets dans les ménages privés. Les groupes de projet d'étudiants, couvrant plusieurs disciplines, travaillent sur le même problème, par exemple les déchets dans les ménages privés, mais chacun avec sa propre perspective disciplinaire. Par exemple, les étudiants en architecture et en design travaillent sur la conception des poubelles, les étudiants en gestion environnementale travaillent sur la logistique, les étudiants en ingénierie électronique travaillent sur les poubelles intelligentes, etc. Les étudiants ont des réunions de mi-parcours en vue de discuter et de fournir un retour pendant le processus d'analyse des problèmes, de conception et de recherche de solutions liées au mégaprojet (AAU* ; Kolmos *et al.*, 2020a ; Routhe *et al.*, 2020).

actif que l'on trouve dans la littérature (Chen *et al.*, 2020). L'initiative est issue des cours magistraux.

2. Une « stratégie d'intégration » qui associe des cours existants à des compétences telles que la gestion de projet et la collaboration. La communauté CDIO (Conceive-Design-Implement-Operate) en constitue un bon exemple. Elle a élaboré une longue liste de normes couvrant le niveau du système, y compris l'assurance qualité et le perfectionnement du personnel académique, l'intégration des aptitudes et des compétences dans le programme d'études et, au minimum, l'intégration de projets réels – principalement des projets d'entreprise – au cours desquels les étudiants apprennent à imaginer, concevoir, réaliser et exploiter (Crawley, *et al.*, 2014 ; Edström et Kolmos, 2014). Cette stratégie exigera d'un responsable pédagogique qu'il incite le personnel à faire des expériences et crée de manière stratégique une vue d'ensemble du programme d'études.
3. Une « stratégie de refonte » implique une restructuration de l'ensemble de l'établissement en créant une nouvelle institution ou un nouveau programme. La stratégie de refonte met l'accent sur le contexte sociétal, permettant tous les types d'apprentissages actifs, y compris des projets plus ouverts. La progression tout au long d'un programme met l'accent à la fois sur les connaissances et les compétences techniques et sur les compétences professionnelles ou liées à l'employabilité. Un tel changement nécessitera également une direction institutionnelle et éducative et il existe un besoin d'enseignants universitaires capables de penser en dehors des carcans et de faciliter les processus de transformation.

Élaboration des programmes

La question est de savoir comment faire évoluer l'enseignement. Les approches descendantes et ascendantes sont toutes deux nécessaires, et elles sont plus efficaces lorsqu'elles sont associées. L'accréditation est aussi importante que le cadre politique global et l'approche descendante. Toutefois, la réforme de l'enseignement doit se produire au niveau institutionnel et impliquera un changement de culture et de compréhension de l'apprentissage au sein du personnel académique. Les changements apportés à la formation d'ingénieurs sont souvent lents, et des stratégies devraient être appliquées pour favoriser des changements plus rapides. La culture jouant un rôle important dans le processus de changement, une approche plus expérimentale de l'enseignement et de l'apprentissage est nécessaire pour créer de nouveaux environnements d'apprentissage innovants. Au niveau institutionnel, trois stratégies éducatives ont été identifiées (Kolmos *et al.*, 2016) :

1. Une « stratégie complémentaire » qui ajoute un apprentissage plus actif aux cours existants. Il s'agit de la stratégie la plus répandue pour passer à un apprentissage centré sur l'étudiant. Cela se reflète dans les nombreux rapports sur l'APP et les expériences d'apprentissage

La mise en place d'une direction pédagogique est essentielle à la création et au maintien de réformes pédagogiques nécessaires, en parallèle de la formation du personnel, dans l'optique d'appliquer des méthodes d'enseignement et d'apprentissage plus innovantes et centrées sur l'étudiant (Graham, 2017 ; Graham, 2018a). Il est également nécessaire de mettre en place des stratégies à la fois descendantes et ascendantes, et cela devrait aller de pair avec le développement du système de promotion, qui reconnaît les expériences éducatives. Il est possible de s'inspirer d'une étude récente sur les grandes universités d'ingénierie qui mettent en application de nouveaux types de modèles centrés sur l'étudiant (Graham, 2018b). L'Olin College of Engineering, le Massachusetts Institute of Technology (MIT), l'Université de Stanford, l'Université d'Aalborg et l'Université de technologie de Delft sont perçus comme des leaders actuels dans l'enseignement des sciences de l'ingénieur, mais cela a également mis en évidence un certain nombre de leaders émergents tels que la Singapore University of Technology and Design, l'University College London, la Pontificia Catholic University of Chile et l'Iron Range Engineering. La plupart de ces établissements instaurent un modèle d'apprentissage cohérent centré sur l'étudiant, qui comprend également des travaux pratiques réalisés à l'extérieur de l'établissement sous forme de stages, de projets d'entreprise ou de conseils pour les entreprises.

Conclusion

La nécessité de repenser les programmes de formation en ingénierie et les approches pédagogiques afin de relever les défis des ODD se pose à l'échelle mondiale, et des recommandations restent à formuler, bien que de nombreux établissements soient déjà en train de mettre en place un enseignement plus complet de la discipline. Nombre de nouveaux établissements et de programmes récents peuvent constituer de bons exemples pour la formation future des ingénieurs, et d'importants établissements plus anciens ont également entamé une transition d'un programme d'études plus traditionnel à des modèles cohérents centrés sur l'étudiant, ouvrant ainsi la voie à un changement à l'échelle mondiale. Les expériences en matière de reformulation des programmes d'études peuvent servir d'inspiration à d'autres personnes en vue d'élaborer leurs propres stratégies et activités pour le développement de ces programmes, qui peuvent à leur tour inspirer les institutions et les gouvernements.

Recommandations

- 1. Amélioration et renforcement de l'enseignement des STEM dans les écoles.** Il s'agit du fondement de l'enseignement supérieur en ingénierie et de l'apprentissage tout au long de la vie. En outre, pour tous les établissements d'enseignement, des écoles aux universités, des départements d'ingénierie aux organismes de formation professionnelle, il est nécessaire d'inclure le thème de la « durabilité » dans le programme d'études afin de « faire en sorte que tous les élèves acquièrent les connaissances et compétences nécessaires pour promouvoir le développement durable » (Objectif de développement durable 4.7).
 - 2. Interdisciplinarité, développement durable et employabilité dans les programmes d'ingénierie.** Les gouvernements devraient davantage insister sur les programmes interdisciplinaires, le développement durable et les compétences professionnelles, en parallèle de modèles de financement adaptés à ces besoins. Il serait important de formuler des critères d'accréditation nationaux, assortis de mesures d'incitations et de récompenses pour les établissements remplissant ces exigences.
 - 3. Investissement dans les études d'ingénierie.** Les gouvernements devraient promouvoir et soutenir les études relatives à l'enseignement des sciences de l'ingénieur afin de développer la pédagogie, l'enseignement et l'apprentissage à un niveau systémique. Les études devraient mettre l'accent sur la résolution de problèmes interdisciplinaires et complexes au moyen d'un apprentissage en ligne, centré sur l'apprenant et axé sur les problèmes.
 - 4. Changement institutionnel incluant la complexité.** Les gouvernements devraient récompenser les établissements
- qui mettent au point de nouveaux modèles systémiques d'apprentissage centrés sur l'apprenant et mixtes. Il s'agit notamment des écoles d'ingénierie qui s'efforcent de modifier l'ensemble des programmes d'études et des méthodes d'apprentissage en créant des modèles éducatifs mixtes intégraux élaborés en coopération avec l'industrie et d'autres acteurs sociaux. Ces modèles se basent sur des problèmes et des projets complexes du monde réel, notamment dans le domaine du développement durable. Des mesures pourraient également être prises pour récompenser et diffuser des exemples de bonnes pratiques aux niveaux national et international.
 - 5. Encadrement pédagogique pour la réforme de l'enseignement.** Les gouvernements devraient investir dans l'encadrement pédagogique, le développer et le reconnaître afin de faciliter et de promouvoir les changements systémiques nécessaires dans la formation en ingénierie. La création d'un système de récompense et de reconnaissance qui appuie, favorise et reconnaît la portée éducative et la direction pédagogique est un élément important dans le développement de l'enseignement des sciences de l'ingénieur.
 - 6. Universitaires en tant qu'acteurs du changement.** Les établissements devraient mettre au point des stratégies de changement de programme et allouer des ressources au développement universitaire obligatoire. Cela passerait également par la mise au point d'autres mesures incitatives telles que des programmes de récompenses pour le personnel universitaire, le développement communautaire, des congés sabbatiques et des subventions annuelles pour l'innovation en matière d'éducation.

Références

- Académie royale d'ingénierie. 2007. *Educating engineers for the 21st century*. Londres, Académie royale d'ingénierie. <https://www.raeng.org.uk/publications/reports/educating-engineers-21st-century>
- Agencia de Noticias UN. 2018. Estudiantes del Peama en Sumapaz realizan proyectos para la comunidad [Des étudiants du Peama réalisent des projets pour la communauté]. Bogota, Université nationale de Colombie. <http://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/articulo/estudiantes-del-peama-en-sumapaz-realizan-proyectos-para-la-comunidad.html>
- Chen, J., Kolmos, A. et Du, X. 2020. Forms of implementation and challenges of PBL in engineering education: a review of literature. *European Journal of Engineering Education*. <https://doi.org/10.1080/03043797.2020.1718615>
- Crawley, E.F., Malmqvist, J., Östlund, S., Brodeur, D.R. et Edström, K. 2014. Teaching and learning. *Rethinking Engineering Education*. Springer-Verlag US, pp. 143 - 163.
- Dochy, F., Segers, M., Van den Bossche, P. et Gijbels, D. 2003. Effects of problem-based learning: A meta-analysis. *Learning and Instruction*, vol. 13, n° 5, pp. 533 - 568.
- Edström, K. et Kolmos, A. 2014. PBL and CDIO: Complementary models for engineering education development. *European Journal of Engineering Education*, vol. 39, n° 5, pp. 539 - 555.
- Gavin, K. 2011. Case study of a project-based learning course in civil engineering design. *European Journal of Engineering Education*, vol. 36, n° 6, pp. 547 - 558.
- Graham, R. 2017. *Snapshot review of engineering education reform in Chile*. Santiago du Chili : Université d'Aalborg/ Université pontificale catholique du Chili. www.rhgraham.org/resources/Review-of-educational-reform-in-Chile-2017.pdf
- Graham, R. 2018a. The career framework for university teaching: Background and overview.
- Graham, R. 2018b. *The global state of the art in engineering education*. Cambridge, MA, Massachusetts Institute of Technology. <https://www.rhgraham.org/resources/Global-state-of-the-art-in-engineering-education---March-2018.pdf>
- Hadgraft, R. 2017. Transforming engineering education: Design must be the core. Document présenté à la 45^e Conférence de la Société européenne pour la formation des ingénieurs, 18-21 septembre 2017, Açores, Portugal.
- Holgaard, J. E., Hadgraft, R., Kolmos, A. et Guerra, A. 2016. Strategies for education for sustainable development – Danish and Australian perspectives. *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, n° 4, pp. 3479 - 3491.
- Jenkins, M., Bokosmaty, R., Brown, M., Browne, C., Gao, Q., Hanson, J. et Kupatadze, K. 2017. Enhancing the design and analysis of flipped learning strategies. *Teaching & Learning Inquiry*, vol. 5, n° 1, pp. 1 - 12. <https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ1148447.pdf>
- Kolmos, A. et de Graaff, E. 2014. Problem-based and project-based learning in engineering education. Dans : *Merging models*. New York, NY, Cambridge University Press, pp. 141 - 161. https://vbn.aau.dk/ws/files/195196355/CHEER_TOC.pdf
- Kolmos, A. 2017. PBL Curriculum Strategies: From course-based PBL to a systemic PBL approach. Dans : A. Guerra, R. Ulseth et A. Kolmos (dir.publ.), *PBL in Engineering Education*. Rotterdam, Pays-Bas, Sense Publishers, pp. 1 - 12. https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/262431640/pbl_in_engineering_education.pdf
- Kolmos, A., Bertel, L. B., Holgaard, J. E. et Routhe, H. W. 2020a. Project Types and Complex Problem-Solving Competencies: Towards a Conceptual Framework. Dans : A. Guerra, A. Kolmos, M. Winther, et J. Chen (dir.publ.), *Educate for the future: PBL, Sustainability and Digitalisation 2020*. Aalborg, Danemark, Aalborg Universitetsforlag, pp. 56 - 65. https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/344787630/Project_Types_and_Complex_Problem_Solving_Competencies.pdf
- Kolmos, A., Hadgraft, R. G. et Holgaard, J. E. 2016. Response strategies for curriculum change in engineering. *International Journal of Technology and Design Education*, vol. 26, n° 3, pp. 391 - 411. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10798-015-9319-y>
- Kolmos, A., Holgaard, J. E., et Clausen, N. R. 2020b. Progression of student self-assessed learning outcomes in systemic PBL. *European Journal of Engineering Education*, pp. 1 - 23. <https://doi.org/10.1080/03043797.2020.1789070>
- Lamb, F., Arlett, C., Dales, R., Ditchfield, B., Parkin, B. et Wakeham, W. 2010. *Engineering graduates for industry*. Londres, Académie royale d'ingénierie. www.raeng.org.uk/publications/reports/engineering-graduates-for-industry-report
- Norman, G.R. et Schmidt, H. G. 2000. Effectiveness of problem based learning curricula: Theory, practise and paper darts. *Medical education*, vol. 34, n° 9, pp. 721 - 728.
- Ordóñez, C., Mora, H., Sáenz, C. et Peña Reyes, J. I. 2017. Práctica del Aprendizaje Basado en Proyectos de la Universidad Nacional de Colombia en la localidad de SUMAPAZ de la ciudad de Bogotá D.C, Colombia [Pratique de l'apprentissage par projet à l'Université nationale de Colombie à SUMAPAZ dans la ville de Bogota, en Colombie]. Dans : A. Guerra, F. J. Rodriguez, A. Kolmos et I. P. Reyes (dir.publ.), *PBL, Social Progress and Sustainability*. Aalborg, Danemark, Aalborg Universitetsforlag, p. 53 à 64. https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/260094430/IRSPBL_2017_Proceedings_1_.pdf

Reidsema, C., Kavanagh, L., Hadgraft, R. et Smith, N. (dir.publ.). 2017. *The Flipped Classroom: Practice and practices in higher education*. Singapour, Springer. <https://www.springer.com/gp/book/9789811034114>

Routhe, H. W., Bertel, L. B., Winther, M., Kolmos, A., Münzberger, P., et Andersen, J. (n.d.) Interdisciplinary Megaprojects in Blended Problem-Based Learning Environments: Student Perspectives. Dans : *Proceedings of the 9th International Conference on Interactive, Collaborative, and Blended Learning (ICBL2020)* Advances in Intelligent Systems and Computing.

Servant-Miklos, V., Holgaard, J. E. et Kolmos, A. 2020. A « PBL effect »? A longitudinal qualitative study of sustainability awareness and interest in PBL engineering students. Dans : A. Guerra, A. Kolmos, M. Winther, et J. Chen (dir.publ.), *Educate for the future: PBL, Sustainability and Digitalisation 2020*. Aalborg, Danemark, Aalborg Universitetsforlag, p. 45 à 55. https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/357965178/AAU_8th_PBL_2020_interaktiv_2.pdf

Snowden, D. J. et Boone, M. E. 2007. A leader's framework for decision making. *Harvard Business Review*, pp. 69 - 76.

Strobel, J. et van Barneveld, A. 2009. When is PBL more effective? A meta-synthesis of meta-analyses comparing PBL to conventional classrooms. *Interdisciplinary Journal of Problem-based Learning*, vol. 3, n° 1, art. 4, pp. 44 - 58. <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1046&context=ijpbl>

UNESCO. 2010. *Ingénierie : enjeux et défis pour le développement*. Paris, Éditions UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000189753>

Zhou, C., Kolmos, A. et Nielsen, J. F. D. 2012. A problem and project-based learning (PBL) approach to motivate group creativity in engineering education. *International Journal of Engineering Education*, vol. 28, n° 1, pp. 3 - 16.

**Soma Chakrabarti,² Alfredo Soeiro³,
Nelson Baker⁴ and Jürgen Kretschmann⁵**

4.2 APPRENTISSAGE TOUT AU LONG DE LA VIE DANS LE DOMAINE DE L'INGÉNIERIE : UN IMPÉRATIF POUR ATTEINDRE LES ODD



Gordenkoff/Shutterstock.com

- 2 Président de l'IACEE, Ansys-Granta, Royaume-Uni.
- 3 Ancien Président de l'IACEE, Universidade do Porto, Portugal.
- 4 Secrétaire-Général et ancien Président de l'IACEE, Georgia Institute of Technology, États-Unis.
- 5 Président de l'université TH Georg Agricola, Bochum, Allemagne. Dernier président sortant de la Society of Mining Professors (Société des professeurs d'ingénierie minière, SOMP).

Résumé. Bon nombre des 17 Objectifs de développement durable peuvent uniquement être atteints grâce à la participation et à la contribution actives d'ingénieurs et de technologues qualifiés. Seulement, l'avènement des nouvelles technologies, l'automatisation, les changements démographiques et la mobilité de l'emploi exigeront une requalification continue de la profession d'ingénieur. Cela nécessitera le renforcement des capacités d'ingénierie, ainsi qu'une approche structurée, l'assurance de la qualité et la reconnaissance de l'apprentissage tout au long de la vie. Ce chapitre analyse l'état actuel de l'apprentissage tout au long de la vie dans le domaine de l'ingénierie et les approches futures pour la création d'un cadre pour les politiques, les infrastructures et l'assurance qualité afin de contribuer à la réalisation des objectifs et des cibles du Programme de développement durable à l'horizon 2030.

Introduction

L'arrivée continue de technologies nouvelles et améliorées et l'automatisation changent le monde à un rythme qui ne cesse d'accélérer. Les nouvelles technologies issues de la quatrième révolution industrielle, parmi lesquelles l'intelligence artificielle, la robotique, les nanotechnologies, l'impression 3D, les chaînes de production et les soins de santé numériques, modifient les emplois, les parcours professionnels et les méthodes de travail (Schwab, 2017). Les progrès récents de l'apprentissage automatique et la disponibilité d'une vaste quantité de données pour former les machines ont conduit à d'importants progrès dans le domaine de l'intelligence artificielle, remplaçant souvent le travail manuel par la technologie. Les robots ont remplacé les activités humaines dans de nombreuses usines de fabrication et continueront de le faire. L'avènement de nouvelles technologies sophistiquées remplace les tâches routinières par des machines ou l'automatisation, ce qui polarise le marché de l'emploi dans les pays développés et les économies émergentes (OCDE, 2017). Bien que cette transformation pose des défis, de nouvelles possibilités d'emploi favorisent la croissance économique et continueront de le faire. En 2030, environ 9 % des professions seront nouvelles, et n'existent pas à l'heure actuelle (Bughin *et al.*, 2018). Pour conclure, l'interaction entre l'automatisation et l'intelligence artificielle, conjuguée aux changements démographiques et aux grandes perturbations sectorielles, modifie la nature du travail du futur (Munro, 2019).

Les tendances suivantes sont prédominantes et prévues pour l'avenir du métier d'ingénieur (Schwartz *et al.*, 2019) :

- La durée de vie d'un ingénieur en activité s'est considérablement allongée au fur et à mesure de l'allongement de la durée de vie et de la carrière des êtres humains. Sur le plan démographique, la population active comprendra un pourcentage plus élevé de personnes âgées (Jenkins, 2019).
- Les ingénieurs changent d'emploi au sein d'une même organisation ou changent plus fréquemment d'employeur, ce qui nécessite une requalification et un perfectionnement continu (WEF et BCG, 2018).
- De nouvelles connaissances sont créées à un rythme croissant et la technologie évolue rapidement. Les ingénieurs et les technologues doivent suivre ces changements et ces innovations pour rester sur le marché du travail (DeLong, 2004).
- Les ingénieurs travaillent sur des projets de plus en plus étendus à travers le monde ou ayant des implications mondiales, souvent tout en travaillant pour des organisations mondiales dans des contextes locaux (WEF, 2016).
- Même si l'automatisation est et sera en mesure de prendre en charge de nombreuses actions humaines, il est peu probable que les compétences non techniques telles que la communication interpersonnelle et l'intelligence émotionnelle soient remplacées par des machines. Les ingénieurs et les technologues doivent acquérir ces compétences pour rester utiles et aptes à l'emploi (Bughin *et al.*, 2018).

La formation continue des ingénieurs et des technologues, aussi appelée apprentissage tout au long de la vie en vue d'une requalification et d'un perfectionnement continu, est donc une nécessité.

L'apprentissage tout au long de la vie dans l'ingénierie porte différents noms, le plus courant étant le développement professionnel continu (DPC) pour ingénieurs et la formation continue des ingénieurs (FCI). L'apprentissage tout au long de la vie ou la FCI prend deux formes :

1. Des diplômes d'études postsecondaires pour les professionnels qui travaillent, qui prévoient des cours en face à face, en ligne, mixtes et hybrides.
2. Des certificats ou des cours non sanctionnés par un diplôme selon diverses méthodes.

Ce chapitre considère plusieurs aspects de l'apprentissage tout au long de la vie dans le secteur de l'ingénierie et de la technologie, en particulier des aspects de ce type d'apprentissage relatifs à l'enseignement professionnel et à la formation à la technologie, cette dernière étant plus utile dans les pays en développement, en particulier pour atteindre les Objectifs de développement durable et leurs cibles. Le chapitre étudie également les partenariats université-industrie et le rôle du secteur privé dans la définition des besoins de perfectionnement ou de requalification à mesure qu'ils se

présentent. La deuxième section du chapitre trace un cheminement de l'apprentissage aux carrières d'ingénieur et de technologue, et fait référence à la mesure et à l'assurance de la qualité des programmes de DPC et des infrastructures en vue de garantir la prestation du plus haut niveau de formation continue et professionnelle et de formations avancées en ingénierie partout dans le monde avec des critères d'accréditation communs. La troisième section du chapitre décrit divers critères d'assurance de la qualité pour la FCI non formelle et formelle.

Formes d'apprentissage tout au long de la vie dans les domaines de l'ingénierie et de la technologie

Comme indiqué plus haut, l'apprentissage tout au long de la vie en ingénierie peut revêtir diverses formes et avoir lieu à différentes étapes de la vie professionnelle. Cette section décrit les formes en question, tout en précisant leurs divers avantages.

Apprentissage sur le lieu de travail dans le cadre de la FCIE

L'apprentissage sur le lieu de travail, souvent appelé apprentissage, est défini comme un système de formation dans un métier ou une profession où l'apprentissage est accompagné d'études dans un établissement d'enseignement ou de formation professionnelle. Cette approche est souvent précieuse pour le cheminement de carrière, car elle permet aux apprenants d'obtenir une licence en vue d'exercer une profession réglementée. Dans le cadre de l'apprentissage en milieu de travail, les apprenants devraient acquérir des compétences mesurables qui pourraient mener à la certification (Krupnick, 2016).

L'Allemagne, par exemple, a largement adopté les systèmes de double apprentissage en tant que cheminement de carrière, ce qui permet aux futurs ingénieurs d'acquérir une expérience précieuse grâce à un apprentissage pratique structuré⁶. Ces apprentissages sont considérés comme bénéfiques en ingénierie où les compétences professionnelles telles que les connaissances techniques et pratiques, les compétences et les aptitudes sont hautement valorisées (Dubouloz, 2016). Ils peuvent également être effectués en parallèle d'un programme d'études en ingénierie dans une université. C'est ce qu'on appelle un programme d'études en alternance.

Il existe souvent une relation contractuelle basée sur la rémunération entre l'employeur et l'apprenti. Les apprenants peuvent même obtenir des diplômes officiels en suivant des programmes d'ingénierie par le biais d'un apprentissage sanctionné par un diplôme. L'étudiant alterne des périodes de travail en entreprise et des études sur le campus,

bénéficiant ainsi d'une supervision et d'un soutien au niveau tant académique que professionnel (Singh, 2015).

Des écoles prestigieuses, comme l'Imperial College et l'École Centrale de Nantes, proposent des diplômes basés sur l'apprentissage. Ces cours vont de l'ingénierie électronique à l'ingénierie industrielle, et couvrent la plupart des domaines d'ingénierie.

Toutefois, l'apprentissage sur le lieu de travail n'a pas été systématiquement adopté dans les pays en développement, et des politiques et des infrastructures claires sont nécessaires. Dans les pays d'Afrique subsaharienne, les apprentissages sont souvent entrepris pour des emplois peu qualifiés et ne débouchent pas sur une formation d'ingénieur ou une formation professionnelle (Bahl et Dietzen, 2019).

Apprentissage non formel et informel (NFIF) pour les ingénieurs

L'apprentissage formel conduit généralement à une certification ou à d'autres formes de reconnaissance. L'apprentissage non formel est intégré dans des activités planifiées qui ne sont pas explicitement désignées comme un apprentissage (en matière d'objectifs d'apprentissage, de temps d'apprentissage ou de soutien à l'apprentissage), mais contient un élément d'apprentissage important. Il ne débouche généralement pas sur une certification ou d'autres formes de reconnaissance, et n'est pas non plus organisé ni structuré en termes d'objectifs, de temps ou de soutien à l'apprentissage (CEDEFOP, 2014).

Si la formation continue NFIF des ingénieurs est courante, l'identification des compétences acquises dans ce cadre nécessite certains processus structurés, tels que :

- la définition des compétences qui peuvent être documentées et validées ;
- la vérification de l'accomplissement des conditions formelles préalables à une éventuelle validation ;
- la détermination des résultats/compétences d'apprentissage souhaités à inclure dans le système ;
- le choix de résultats d'apprentissage qui méritent d'être documentés ;
- l'identification des compétences que les employeurs souhaitent voir les ingénieurs acquérir.

Bien que certaines institutions universitaires aux États-Unis ou en France et plusieurs organisations professionnelles d'ingénieurs, dont le Board of Engineers Malaysia, l'Engineers Ireland ou la Japan Society of Civil Engineers, reconnaissent les réalisations de DPC, un processus structuré de validation et de reconnaissance des apprentissages non diplômants et non

⁶ Renseignements sur la « Boîte à outils de l'apprentissage » en Allemagne : www.apprenticeship-toolbox.eu/germany/apprenticeship-system-in-germany/143-apprenticeship-system-in-germany

L'ingénierie au service du développement durable

crédités après le baccalauréat NFIF est plutôt rare et manque de procédures formelles d'assurance qualité (Feutrie, 2012 ; Pardo, 2016).

L'objectif global est de mettre en place un système de documentation et de validation des acquis de l'apprentissage NFIF des ingénieurs reconnus par les entreprises, les organisations professionnelles et la société, contribuant ainsi à accroître la transparence et la mobilité des ingénieurs dans le monde. Cette mesure est cruciale, car certaines régions du monde manquent d'ingénieurs qualifiés, tandis que des ingénieurs qualifiés recherchent des stages dans d'autres régions en raison du chômage.

L'utilisation d'un portfolio électronique, proposé par le cadre de reconnaissance des compétences Europortfolio (2015), constitue une approche efficace et systématique d'évaluation des compétences de l'apprentissage NFIF en ingénierie, qui soutient les processus de reconnaissance et d'accréditation des compétences. Le portfolio électronique fournit un environnement dans lequel les ingénieurs peuvent :

- créer une archive numérique de leur travail ;
- sélectionner des travaux spécifiques (hyperliens ou documents) pour mettre en évidence des réalisations ;
- fixer des objectifs pour la formation future afin de s'améliorer ;
- partager l'apprentissage avec d'autres personnes et recevoir des commentaires de leurs pairs dans le cadre de la rétroaction formative ; et
- rassembler des preuves de l'apprentissage au fil du temps, qui peuvent être présentées à différents publics à des fins de validation, de reconnaissance ou de certification professionnelle.

Les portfolios électroniques d'apprentissage NFIF offrent un système souple, mais robuste, qui permet d'évaluer les compétences. Ils fournissent également aux associations professionnelles, aux agences d'accréditation et aux ingénieurs un mécanisme grâce auquel les ingénieurs peuvent mettre en valeur leurs connaissances, leurs aptitudes et leurs compétences acquises par le biais d'un apprentissage NFIF. Dans un avenir proche, une plus grande utilisation des activités de la blockchain pourrait regrouper les portfolios électroniques et autres titres de compétences pour constituer le dossier personnel de l'élève (Roebuck, 2019).

Évaluation de l'apprentissage NFIF et de la carte FEANI

L'évaluation de l'apprentissage NFIF peut être divisée en deux catégories : i) une auto-évaluation telle qu'un plan de développement personnel (PDP) ; et ii) une évaluation externe par des associations professionnelles qui tiennent des dossiers numériques. Ce dernier processus a été mis en œuvre par plusieurs organisations professionnelles dans le monde entier, notamment en Australie, en Irlande, au Japon, en Malaisie et aux États-Unis.

Les compétences professionnelles des ingénieurs étant généralement établies par des associations professionnelles ou des chambres de commerce, il est impossible de créer un ensemble commun de compétences pour différents pays et pour différentes spécialisations en ingénierie. Pour résoudre ce problème, la Fédération européenne d'associations nationales d'ingénieurs (FEANI) a créé la carte d'ingénierie. Cette carte fournit des informations sur l'ingénieur, y compris le niveau d'études, l'expérience professionnelle et la FCI ou le DPC. Elle définit le groupe de compétences que chaque ingénieur peut acquérir et propose un système de portfolio électronique pour enregistrer les preuves des compétences acquises dans les processus NFIF. Chaque organisme d'accréditation ou professionnel peut utiliser ce portfolio électronique pour reconnaître les compétences acquises par chaque ingénieur. La FEANI a également mis en place un système d'attribution de crédits de DPC aux ingénieurs. Ce système est volontaire et est utilisé par les organisations professionnelles des membres de la FEANI⁷.

Rôle des prestataires formels de FCI

Les prestataires formels de FCI jouent également un rôle dans la reconnaissance des compétences NFIF en ingénierie. Ils définissent les modules et les cours qui complètent l'éducation et la formation des candidats désireux d'obtenir un certain diplôme. Ces cours se heurtent souvent aux mêmes obstacles que l'apprentissage NFIF. En conséquence, l'assurance qualité visant à favoriser la reconnaissance des compétences par les organisations professionnelles est devenue obligatoire dans certains pays (Werquin, 2010).

Assurance de la qualité de l'apprentissage tout au long de la vie et de l'apprentissage NFIF en ingénierie

Les cadres de qualité pour l'éducation formelle varient considérablement à travers le monde, une variabilité qui concerne la formation continue, l'apprentissage tout au long de la vie et l'apprentissage NFIF. Même à l'intérieur des pays, les normes et les exigences de l'industrie en matière d'apprentissage tout au long de la vie et d'apprentissage NFIF peuvent varier selon la législation nationale et les exigences des associations professionnelles. En outre, les sources de financement et les moteurs de la FCI varient considérablement d'un pays à l'autre. Par exemple :

- En Chine, le Ministère des ressources humaines et de la sécurité sociale établit les exigences en matière de formation continue des ingénieurs et finance l'Association chinoise pour la formation continue des ingénieurs (*Chinese Association for Continuing Engineering Education - CACEE*)⁸ afin qu'elle puisse élaborer et dispenser des programmes

⁷ Vous pouvez consulter la liste des membres professionnels en suivant ce lien : <https://www.feani.org/feani/membership-list-0>

⁸ Pour plus de renseignements sur la CACEE, consulter le lien suivant : www.cacee.org.cn [en chinois].

et des cours aux ingénieurs et aux techniciens de tout le pays. La formation et la périodicité sont obligatoires.

- Aux États-Unis, les sociétés professionnelles qui délivrent des permis d'exercice aux ingénieurs établissent les exigences relatives à la FCI, mais les cours et les programmes sont élaborés et assurés par des établissements d'enseignement supérieur, des sociétés professionnelles et des organismes gouvernementaux ou des entreprises qui emploient des ingénieurs.
- Au sein de l'Union européenne, la Commission européenne finance des projets d'universités ou d'autres organisations afin qu'ils mettent au point et assurent des cours et des programmes.
- Cette diversité à l'échelle mondiale est problématique pour les ingénieurs, car elle limite la mobilité et l'acceptation des licences (FEANI, 2018).

Cette diversité à l'échelle mondiale est problématique pour les ingénieurs, car elle limite la mobilité et l'acceptation des licences (FEANI, 2018).

Rôles des associations professionnelles

Comme Markkula (1995) l'a fait remarquer, les associations et organisations professionnelles d'ingénieurs ont la responsabilité de fournir et de valider l'apprentissage tout au long de la vie des ingénieurs. Le système irlandais d'accréditation du DPC pour les professionnels est conçu pour soutenir l'apprentissage tout au long de la vie en encourageant et en reconnaissant les bonnes pratiques utilisées par les ingénieurs. Les ingénieurs doivent effectuer au moins cinq jours d'apprentissage formel chaque année⁹. En Malaisie, le Conseil des ingénieurs a imposé un système accrédité par l'Institute of Engineers of Malaysia (IEM)¹⁰. Chaque ingénieur doit suivre chaque année au moins cinquante heures de formation en moyenne par période triennale. Le système d'accréditation australien est identique à celui de la Malaisie, car les deux pays font partie de l'Asia Pacific Economic Cooperation Engineering, de même que le Canada, Hong Kong (Chine), le Japon, la Nouvelle-Zélande, les Philippines, la Corée du Sud, la Thaïlande et les États-Unis. En 2001, ce groupe a décidé d'adopter ce système d'accréditation de DPC (Accord de Sydney) et la majorité d'entre eux l'ont mis en œuvre¹¹. Aux États-Unis, l'accréditation périodique est accordée par le National Council of Examiners for Engineering and Surveying (NCEES) et est appelée Continuing Professional Competency¹².

Rôles des gouvernements

Le rôle des gouvernements varie pour ce qui est des différents types de financement et de soutien qu'ils fournissent à travers le monde. En ce qui concerne les cadres législatifs, les gouvernements peuvent établir

des lois mettant en œuvre le DPC et l'apprentissage tout au long de la vie en tant que fonctions des universités en matière de recherche et de formation des diplômés et des étudiants de troisième cycle, ou il peut y avoir un manque d'intérêt. Un argument politique récurrent à cet égard est que l'investissement dans le capital humain est vital pour la croissance économique et le développement de la société et contribuera à soutenir la compétitivité mondiale (EUCEN, 2019).

Rôle de l'industrie

La relation entre les universités et l'industrie est importante pour les activités d'apprentissage tout au long de la vie. Les industries connaissent généralement les compétences et les connaissances requises pour leur main-d'œuvre et recherchent des employés potentiels ayant cette perspicacité. L'industrie finance également la formation et l'éducation de ses employés afin qu'ils acquièrent de nouvelles connaissances et compétences. Les compétences de base des universités consistent à découvrir de nouvelles connaissances et à dispenser un apprentissage, deux éléments souhaités par l'industrie. La réussite de l'apprentissage tout au long de la vie dépend donc d'une bonne communication entre les deux parties.

Cadres de qualité pour la validation de l'apprentissage tout au long de la vie et de l'apprentissage NFIF

Les universités utilisent deux modèles pour fournir une accréditation pour le DPC en ingénierie. Les industries accréditent et évaluent également le DPC et les modules ou cours en utilisant leurs propres procédures basées sur ces deux types de modèles :

- Le premier modèle accrédite les centres et les prestataires de DPC pour les ingénieurs pendant un certain temps au moyen d'un système d'auto-évaluation pour la gestion de la qualité et l'amélioration continue. Pendant cette période, les administrateurs de ces centres et les organismes prestataires de DPC peuvent utiliser le niveau de qualité évalué pour l'accréditation comme valeur ajoutée dans les rapports annuels destinés aux intervenants, comme les doyens ou les recteurs. Cette accréditation peut également être utilisée comme un label d'assurance qualité pour les participants potentiels en ingénierie.
- Le second modèle accrédite des actions ou des modules de formation uniques présentant des avantages pour les ingénieurs, comparables aux actions de formation des prestataires accrédités.

Les deux modèles sont adaptés dans le monde entier et le choix dépend du coût, de la culture de travail des entreprises et des ingénieurs, des réglementations et des procédures établies¹³. Le programme qualité de l'IACEE est un exemple d'accréditation des centres¹⁴. Le modèle proposé est inspiré de la Fondation européenne pour la gestion de la qualité (EFQM) et sert à améliorer la qualité

9 Pour plus de renseignements sur les activités de DPC, consulter le lien suivant : <https://www.engineersireland.ie/Professionals/CPD-Careers/CPD-activities>

10 Pour plus de renseignements sur le DPC, consulter le lien suivant : www.myiem.org.my/content/cpd-250.aspx

11 Voir www.engineersaustralia.org.au/Training-And-Development/MYCPD

12 Pour plus de renseignements sur le NCEES, consulter le lien suivant : <https://ncees.org>

13 Voir l'exemple du Programme Atlantis de l'UE et des États-Unis : <http://daete.up.pt>

14 Pour plus de renseignements sur le Programme de qualité pour la formation continue de l'IACEE : www.iacee.org/iacee_quality_program.php

des centres grâce à l'auto-évaluation, à l'accréditation externe ou à un organisme d'évaluation (Wagenaar et Gonzalez, 2018).

Conclusion

L'association de nouvelles méthodes d'enseignement formel des sciences de l'ingénierie au niveau du premier cycle et des cycles supérieurs traditionnels aux méthodes décrites dans le présent chapitre permettra de former des ingénieurs compétents à l'échelle mondiale. Aucune activité en soi ne suffit dans le monde actuel, qui est complexe et en rapide évolution. L'inclusion de l'apprentissage en cours d'emploi par le biais d'activités d'apprentissage NFIF est justifiée, de sorte que l'accent mis sur l'apprentissage constant, la réflexion et la crédibilité de l'information acquise puisse faire partie de la vie quotidienne d'un ingénieur ou d'un technicien en ingénierie, permettant la pleine réalisation des Objectifs de développement durable au niveau mondial. L'encadrement de l'UNESCO, en partenariat avec de nombreuses autres organisations mondiales, doit permettre la rééducation et le réoutillage continu du personnel de demain.

Recommandations

Trois recommandations qui méritent d'être approfondies sont présentées ci-dessous. Le rythme rapide de création de nouvelles connaissances à travers le monde nécessitera que ces recommandations restent souples et sujettes à modification.

1. *Création d'un groupe de travail mondial.* Il est recommandé de convoquer un groupe de travail mondial regroupant à la fois la sphère pédagogique et l'industrie pour permettre l'identification et la collecte des pratiques existantes en matière de formation continue des ingénieurs et dans les domaines connexes. Un rapport de la National Academy of Engineering des États-Unis (Dutta, Patil et Porter, 2012) a fait la lumière sur cette question. De plus, le groupe pourrait recommander une méthodologie et un processus permettant de saisir, de valider, de partager et de faire accepter les crédits d'apprentissage en ingénierie par les organismes de gouvernance du monde entier. Ce processus devrait se concentrer sur les normes de formation tout au long de la vie nécessaires pour l'ingénierie et les domaines connexes. Si l'UNESCO, en partenariat avec les principales associations professionnelles d'ingénieurs telles que la CACEE, l'IACEE, l'American Society for Engineering Education (ASEE) et l'European Society for Engineering Education (SEFI) demandent la création d'un tel groupe, leurs réponses contribueront à mobiliser ces efforts.
2. *Réduction ou élimination des obstacles réels et perçus.* Le groupe de travail devra examiner les obstacles réels et perçus à la mise en place d'une pratique de formation tout au long de la vie disponible et acceptée à l'échelle

mondiale dans le domaine de l'ingénierie, ainsi que les solutions possibles. Voici quelques-uns des défis à relever :

- des exigences cohérentes qui sont mieux acceptées à l'échelle mondiale ; et
 - des mécanismes de financement à travers le monde pour la formation continue en ingénierie plutôt que des poches de soutien aux entreprises ou aux gouvernements.
3. *Idées suivantes pouvant constituer des outils potentiels dans les solutions futures :*
 - stockage des identifiants Blockchain ;
 - carte d'ingénierie similaire à celle de la FEANI ;
 - nouveaux modèles commerciaux et pédagogiques pour l'éducation tout au long de la vie.
 4. *Création de politiques globales et de tableaux de bord associés.* Les politiques mondiales de partage et de reconnaissance de la FCI peuvent être mises en œuvre par des conversations, des propositions et l'adoption de processus. L'élaboration d'un ou de plusieurs tableaux de bord est envisagée pour faciliter le suivi des progrès réalisés par le groupe en ce qui a trait aux objectifs et aux recommandations. Les tableaux de bord fourniront à la fois le contenu et le contexte des recommandations, en s'assurant que toutes les composantes de la main-d'œuvre internationale sont incluses dans la réflexion et l'action.

Remerciements

Les auteurs remercient les personnes suivantes pour l'aide qu'elles leur ont apportée par l'intermédiaire d'informations pour la recherche : Xiujun Wu et Chunyan Li (China Association for Continuing Engineering Education, Chine), Kim Scalzo (State University of New York, États-Unis) et le Professeur Hyoungkwan Kim (Yonsei University, Corée du Sud).

Références

- Bahl, A. et Dietzen, A. (dir.publ.). 2019. *Work-based learning as a pathway to competence-based education. Contribution au Centre international de l'UNESCO pour l'enseignement et la formation techniques et professionnels (UNEVOC)*. Bonn, Institut fédéral pour la formation professionnelle. www.bibb.de/veroeffentlichungen/de/publication/download/9861
- Bughin, J., Hazan, E., Lund, S., Dahlstrom, P., Weisinger, A. et Subramaniam, A. 2018. Skill shift: Automation and the future of the workforce. McKinsey Global Institute. <https://www.mckinsey.com/featured-insights/future-of-work/skill-shift-automation-and-the-future-of-the-workforce>
- CEDEFOP. 2014. *Terminology of European education and training policy: A selection of 130 terms* (2^e édition). Centre européen pour le développement de la formation professionnelle. Luxembourg, Office des publications de l'Union européenne. www.cedefop.europa.eu/EN/Files/4117_en.pdf
- DeLong, D. W. 2004. *Lost knowledge: Confronting the threat of an aging workforce*. New York, Oxford University Press.
- Dubouloz, C. 2016. La Suisse, pays de l'apprentissage, *Le Temps*, 27 décembre. www.letemps.ch/suisse/suisse-pays-lapprentissage
- Dutta, D., Patil, L. et Porter, J. B. Jr. 2012. *Lifelong Learning Imperative in Engineering. Sustaining American Competitiveness in the 21st Century*. Académie nationale d'ingénierie. Washington, D.C., National Academic Press. <https://www.nap.edu/read/13503/chapter/1>
- EUCEN. 2019. European Report Summary: THENUCE – Thematic Network in University Continuing Education. EUCEN Studies Files. Barcelone, Espagne European University Continuing Education Network. https://eucenstudies.files.wordpress.com/2019/01/eucen_thenuce_summary29jan19.pdf
- Europortfolio. 2015. *Europortfolio competency recognition framework*. <http://www.eportfolio.eu/resources/contributions/europortfolio/competency-framework>
- FEANI. 2018. *A system for validation of NFIF learning of engineers (NFIF)*. Bruxelles, Fédération Européenne des Associations Nationales des Ingénieurs.
- FEM. 2016. The Future of Jobs. Employment, skills and workforce strategy for the Fourth Industrial Revolution. Forum économique mondial. www3.weforum.org/docs/WEF_Future_of_Jobs.pdf
- Feutrie, M. 2012. The recognition of individual experience in a lifelong learning perspective: Validation of NFIF learning in France. *Lifelong learning in Europe*, vol. 13, n° 3, pp. 164 - 171.
- Jenkins, J. A. 2019. An aging workforce isn't a burden. It's an opportunity. Forum économique mondial. www.weforum.org/agenda/2019/01/an-aging-workforce-isnt-a-burden-its-an-opportunity
- Krupnick, M. 2016. U.S. quietly works to expand apprenticeships to fill white-collar jobs. With other countries' systems as a model, apprenticeships have started to expand. *The Hechinger Report*, 27 septembre. <https://hechingerreport.org/u-s-quietly-works-to-expand-apprenticeships-to-fill-white-collar-jobs>
- Markkula, M. 1995. The role of professional organizations in developing systems for lifelong learning. *Industry and Higher Education*, vol. 9, n° 4, pp. 227 - 235.
- Munro, D. 2019. *Skills, training and lifelong learning*. Key Issues Series 1. Ottawa, Forum des politiques publiques. <https://ppforum.ca/wp-content/uploads/2019/03/SkillsTrainingAndLifelongLearning-PPF-MARCH2019-EN.pdf>
- OCDE. 2017. *Perspectives de l'emploi de l'OCDE*. Organisation de coopération et de développement économiques. Paris, Éditions OCDE. https://www.oecd-ilibrary.org/employment/perspectives-de-l-emploi-de-l-ocde-2017_empl_outlook-2017-fr
- Pardo, F. 2016. El Acceso de los Ingenieros al Ejercicio de la Profesión en los Principales Países [Accès des ingénieurs à l'exercice de la profession dans les principaux pays]. Madrid, Federación de Asociaciones de Ingenieros Industriales de España (FAIE). www.ica.es/articulo-revista/el-acceso-de-los-ingenieros-al-ejercicio-de-la-profesion-en-los-principales-paises (en espagnol)
- Roebuck, K. 2019. 5 ways blockchain is revolutionizing higher education. *Forbes*, 2 janvier. www.forbes.com/sites/oracle/2019/01/02/5-ways-blockchain-is-revolutionizing-higher-education/#3810c06a7c41
- Schwab, K. 2017. *The Fourth Industrial Revolution*. New York, NY, Crown Business.
- Schwartz, J., Hartfield, S., Jones, R. et Anderson S. 2019. Redefining work, workforces and workplaces. *Deloitte Insights*. www2.deloitte.com/insights/us/en/focus/technology-and-the-future-of-work/redefining-work-workforces-workplaces.html
- Singh, M. 2015. *Global perspectives on recognising non-formal and informal learning. Why recognition matters*. Hambourg, Allemagne, Institut de l'UNESCO pour l'apprentissage tout au long de la vie. Springer Open. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000233655>
- Wagenaar, R. (dir.publ.). 2018. Measuring and Comparing Achievements of Learning Outcomes in Education in Europe (CALOHEE). Groningen, Allemagne, Université de Groningen.
- WEF et BCG. 2018. Towards a reskilling revolution: A future of jobs for all. Forum économique mondial et Boston Consulting Group. www3.weforum.org/docs/WEF_FOW_Reskilling_Revolution.pdf
- Werquin, P. 2010. *Reconnaître l'apprentissage non formel et informel : Résultats, politiques et pratiques*. Paris, Éditions OCDE.

José Vieira¹⁵ et Eli Haugerud¹⁶

4.3 DÉVELOPPEMENT PROFESSIONNEL CONTINU DES INGÉNIEURS



Available under CC BY-NC-ND 2.0 This is Engineering

¹⁵ Président de la Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs (FMOI).

¹⁶ Membre du Comité européen de surveillance (EMC) et de la Fédération européenne d'associations nationales d'ingénieurs (FEANI).

Résumé. L'environnement difficile de l'évolution technologique continue exige des ingénieurs qualifiés et compétents qui peuvent contribuer à la réalisation des Objectifs de développement durable des Nations Unies et s'efforcer de trouver des solutions innovantes et durables. Pour ce faire, les ingénieurs doivent continuellement acquérir de nouvelles connaissances et compétences, et mettre à jour leurs compétences existantes afin d'intégrer les compétences individuelles et collectives. Le développement professionnel continu (DPC) peut jouer un rôle fondamental dans l'adaptation de l'ingénieur aux innovations technologiques et aux nouvelles méthodes de travail afin de mieux remplir son engagement envers la société. À cet égard, les systèmes de certification professionnelle des ingénieurs pourraient revêtir une importance capitale pour la reconnaissance des qualifications et des compétences professionnelles des ingénieurs dans le monde entier en établissant des exigences minimales de connaissances, d'aptitudes et de compétences pour la profession d'ingénieur.

Tendances et défis auxquels les ingénieurs sont confrontés

Les ingénieurs peuvent régler certains problèmes et travailler à la réalisation des 17 Objectifs de développement durable avec une approche innovante et basée sur des solutions (ONU, 2020). Les ingénieurs doivent mettre à jour leurs compétences en matière de qualifications, de connaissances et d'expériences, de manière à pouvoir contribuer à un environnement tourné vers l'avenir (IACEE)¹⁷. Une grande partie des bases de l'ingénierie restent les mêmes, mais des compétences supplémentaires et des tendances doivent être satisfaites et traitées en conséquence par les ingénieurs eux-mêmes, mais aussi par la profession d'ingénieur dans son ensemble. Ces éléments, ainsi que l'augmentation des migrations (CE, 2017 ; Trevelyan et Tilli, 2011), sont pertinents pour évaluer les compétences nécessaires en vue d'un avenir durable.

Des mégatendances pertinentes existent également au sujet des ingénieurs et de leur rôle. Ces tendances sont l'automatisation, l'intelligence artificielle et la numérisation (CEDEFOP, 2020a). Les enjeux de la numérisation pourraient donner naissance

à de nouvelles formes de travail et d'apprentissage, telles que le travail sur plateforme ou le travail sur ordinateur, ou le travail à distance basé sur les TIC (CEDEFOP, 2020b). La numérisation transformera la pratique de l'ingénierie en un nouveau paradigme, basé sur le réseau, les données et l'intelligence artificielle. Le rôle des ingénieurs va donc changer et se retrouver plus ou moins haut dans la hiérarchie des compétences, ce qui peut entraîner une polarisation du marché du travail et une inadéquation des compétences.

Afin de demeurer compétents sur le plan professionnel dans ce monde en constante évolution, les ingénieurs devraient continuellement acquérir de nouvelles connaissances et aptitudes, et mettre à jour leurs compétences existantes afin d'intégrer les savoir-faire individuels et collectifs (FEM et BCG, 2018). Le DPC peut être défini comme le maintien et le développement intentionnel des connaissances et des compétences nécessaires pour exercer dans un contexte professionnel. Il peut s'agir d'affiner les compétences actuelles ou de les développer à un nouveau niveau, ou encore d'en acquérir de nouvelles qui élargissent le rôle d'un employé ou le préparent à une éventuelle promotion (DPC, 2020). Le DPC pour ingénieurs englobe à la fois l'acquisition de nouvelles capacités pour étendre les compétences et l'amélioration des capacités existantes pour se tenir au courant de l'évolution des technologies et de leurs applications. Il convient de noter qu'il n'est pas seulement destiné à mettre à jour et à améliorer les connaissances et les compétences techniques des ingénieurs, mais aussi à approfondir la compréhension du développement durable et de ses objectifs, ainsi qu'à promouvoir la sensibilisation aux codes éthiques qui évoluent avec le développement social et technique des ingénieurs.

Comment travailler avec le DPC

Le DPC est essentiel au maintien de normes professionnelles élevées, et il améliore l'employabilité et la mobilité des ingénieurs. Il facilite la progression de la carrière et renforce la satisfaction professionnelle. C'est à l'individu de s'engager dans le DPC, mais cela nécessite la coopération, l'encouragement et le soutien des employeurs et des institutions professionnelles et universitaires. Dans un souci d'efficacité maximale, le DPC doit être planifié et concerner des objectifs spécifiques. Il est essentiel de réfléchir à ce qui a été appris pour permettre la mise à jour périodique du programme de développement des compétences (PDC) d'un individu.

Pour contribuer à une meilleure utilisation du DPC, les institutions et les autorités nationales doivent mettre en évidence le rôle clé que peuvent jouer les ingénieurs professionnels qualifiés dans la croissance économique et le développement de la

¹⁷ Site Web officiel de l'Association internationale pour la formation continue des ingénieurs : www.iacee.org

société. Les entreprises, les universités, les organisations professionnelles et autres entités d'ingénierie doivent être encouragées à investir dans la démarche. Il faut encourager le DPC de qualité ainsi que les pratiques innovantes en matière d'apprentissage, et montrer les bons exemples et les meilleures pratiques pour aider chaque partie à trouver des moyens pertinents de le mettre en œuvre (FEANI, 2020).

Les ingénieurs ont constamment besoin d'y avoir recours afin de conserver et de développer leurs compétences professionnelles. À cet égard, les ingénieurs sont encouragés à :

- Reconnaître l'importance du DPC pour leur carrière, leur employabilité et leur mobilité, ainsi que pour leur satisfaction et leur bien-être professionnels à tous les âges et à toutes les étapes de leur carrière.
- Prendre activement en charge leur développement professionnel et personnel et investir dans le DPC. Au niveau personnel, établir un DPC et une idée générale d'un objectif de carrière.
- Négocier un plan de DPC réaliste avec son employeur, qui développe les compétences de manière systématique, garantit une bonne exécution des tâches et permet le développement de la carrière.
- Travailler activement à la réalisation du plan de DPC. Enregistrer systématiquement les activités de DPC et les réalisations afin de pouvoir démontrer le maintien ou le développement des compétences professionnelles et, si nécessaire, d'évaluer et de reconnaître les compétences acquises.
- S'efforcer d'assurer la qualité du DPC personnel, ainsi que l'utilisation d'une variété de méthodes, comme des cours/programmes formels, des études universitaires, des visites professionnelles, un apprentissage sur le lieu de travail.

Dans les pays où l'accès aux activités professionnelles d'ingénieur est soumis à un enregistrement obligatoire, il est déjà courant de reconnaître et de valoriser les réalisations de DPC des ingénieurs dans le maintien de leur statut professionnel. En général, l'évaluation se fait par l'attribution de crédits de DPC acquis dans le cadre de différents types d'activités : activités de développement, de travail et individuelles (ASCE¹⁸ ; EA¹⁹ ; ECSA²⁰ ; ECI²¹ ; ENGC²²).

Systèmes de certification professionnelle des ingénieurs

Des cadres nationaux de qualifications ont été adoptés dans le monde entier comme instruments de classification des qualifications d'un pays à différents niveaux. Des efforts importants ont également été mis en œuvre pour établir des cadres régionaux de qualifications afin de comparer les compétences et les qualifications au niveau international (CEDEFOP/ETF/UNESCO/UIL, 2020). Cependant, il reste encore beaucoup de chemin à parcourir pour mettre en place des mécanismes internationaux de reconnaissance des aptitudes et compétences professionnelles en ingénierie.

La qualité de la formation des ingénieurs est généralement assurée au niveau national par l'accréditation accordée par les institutions gouvernementales ou les associations professionnelles. Pour des raisons éducatives, sociales et politiques, la reconnaissance des diplômes d'ingénieur au niveau international constitue néanmoins une question complexe et très sensible qui entrave la mobilité des professionnels. Même dans les zones de forte intégration politique, telles que l'Union européenne, la reconnaissance mutuelle des diplômes continue de se heurter à de grandes difficultés. Certaines initiatives visant à faciliter la reconnaissance mutuelle ont été développées avec succès par des associations professionnelles dans le cadre d'accords multilatéraux, tels que le Réseau européen pour l'accréditation des ingénieurs²³ et l'Alliance internationale d'ingénierie²⁴.

Des efforts pour mettre en place des programmes de formation continue en ingénierie ont été effectués dans le monde entier. Une grande variété de méthodes d'enseignement, y compris des cours en face à face ou en ligne, ont été adoptées dans le cadre d'activités d'apprentissage tout au long de la vie dans différentes régions géographiques : Europe et États-Unis (Dutta, Patil et Porter, 2012), Afrique (Kirkland, Vitanov et Schaefer, 2007), Chine et Inde (Li, 2012 ; Singh, Sarkar et Bahl, 2018). Toutefois, il n'existe pas de processus d'accréditation standard à l'échelle mondiale qui permette une reconnaissance mutuelle facile de la qualité des DPC et de l'intégration des ingénieurs.

La mondialisation des marchés du travail, la mobilité des étudiants et des travailleurs, l'augmentation des migrations, l'automatisation, la numérisation, la polarisation du marché du travail et l'inadéquation des compétences constituent certains des défis que l'ingénierie doit relever à l'échelle mondiale pour progresser de manière significative vers la réalisation des Objectifs de développement durable. À cet égard, l'élaboration

18 Site Web officiel de l'American Society of Civil Engineers (Société américaine des ingénieurs civils) : <https://www.asce.org/continuing-education>

19 Site Web officiel d'Engineers Australia (Ingénieurs d'Australie) : www.engineersaustralia.org.au

20 Site Web officiel de l'Engineering Council of South Africa (Conseil d'ingénierie d'Afrique du Sud) : www.ecsa.co.za

21 Site Web officiel de l'Engineering Council of India (Conseil d'ingénierie de l'Inde) : www.ecindia.org

22 Site Web officiel de l'Engineering Council (Conseil d'ingénierie) : www.engc.org.uk/professional-development/continuing-professional-development-cpd

23 Site Web officiel du Réseau européen pour l'accréditation des ingénieurs : www.enaee.eu

24 Site Web officiel de l'Alliance internationale d'ingénierie

et la mise en place de systèmes de certification professionnelle des ingénieurs pourraient revêtir une importance capitale pour la reconnaissance des qualifications et des compétences professionnelles des ingénieurs dans le monde entier en établissant des exigences minimales de connaissances, d'aptitudes et de compétences pour la profession d'ingénieur.

Pour constituer un mécanisme accepté, efficace et utile, le système de certification professionnelle des ingénieurs doit respecter les systèmes établis au niveau tant national qu'international et inspirer confiance envers l'assurance qualité sur trois fondements essentiels : l'enseignement de l'ingénierie, les compétences professionnelles, et le DPC et l'apprentissage tout au long de la vie. Des détails sur les systèmes de certification professionnelle des ingénieurs sont fournis dans l'encadré 1.

Recommandations

- Facilitation du développement et de la mise en œuvre de systèmes de certification professionnelle des ingénieurs qui pourraient être d'une importance capitale pour la promotion du DPC, pour la reconnaissance des qualifications et des compétences professionnelles des ingénieurs dans le monde entier.
- Incitation à investir dans le DPC de leurs ingénieurs pour les employeurs, en termes d'innovation et de solutions durables afin de garantir que leurs employés restent compétents et que les compétences de leur entreprise soient à jour.
- Incitation des ingénieurs à jouer un rôle actif dans leur DPC afin de garantir leur employabilité et leur mobilité.

Encadré 1. Systèmes de certification professionnelle des ingénieurs

Caractéristiques d'un système de certification professionnelle des ingénieurs

- Formation et expérience professionnelle en ingénierie combinées à un niveau requis de capacité en ingénierie.
- Systèmes basés sur l'assurance qualité et les valeurs.
- Formation initiale formelle des ingénieurs se déroulant généralement dans les universités, les universités de sciences appliquées et les écoles techniques supérieures. Elle peut prendre la forme d'un premier cycle, d'un deuxième cycle ou de programmes intégrés, qui ont soit un profil orienté vers les applications, soit un profil orienté vers les concepts/théories.
- Compétence professionnelle ne décrivant pas le processus d'apprentissage de l'individu, mais partant du principe qu'un apprentissage a eu lieu. Elle peut être le résultat de plusieurs parcours individuels de processus d'apprentissage non formels ou informels. Dans un souci de mesure/évaluation, il est nécessaire de démontrer le résultat de l'apprentissage.
- Acquis de l'apprentissage et compétences intégrant le DPC, devant être évalués et vérifiés.

Importance d'un système de certification professionnelle des ingénieurs

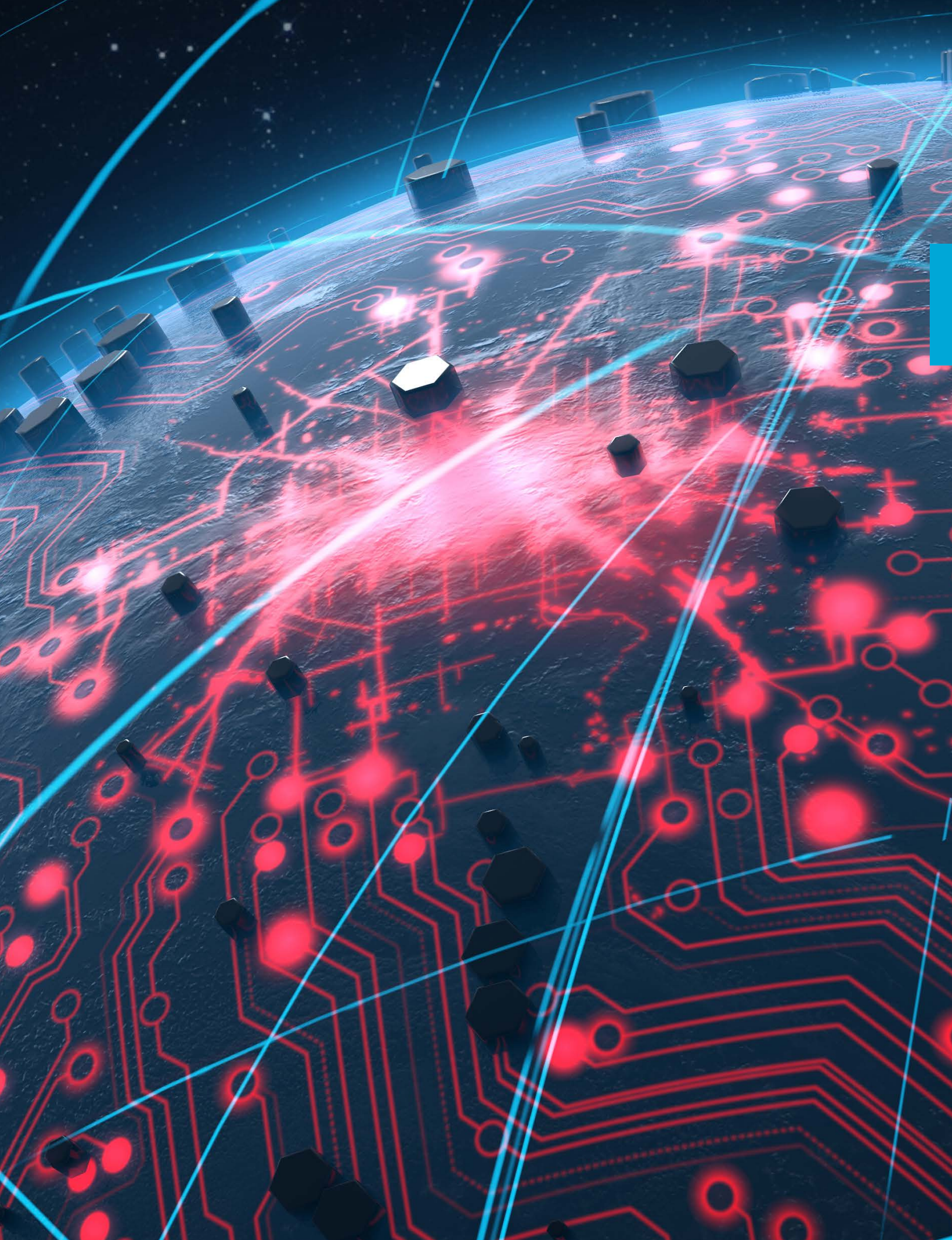
- Établir des exigences minimales en matière de connaissances, d'aptitudes et de compétences pour la profession d'ingénieur.
- Contribuer à la reconnaissance mutuelle des formations d'ingénieur et des capacités professionnelles des ingénieurs à l'échelle mondiale.
- Faciliter la mobilité des professionnels dans le cadre d'un système partagé et accepté dans un scénario de mondialisation économique et de progrès technologiques continus.
- Respecter les systèmes établis au niveau tant national qu'international.

Références

- CE. 2017. 10 trends shaping migration. Centre européen de stratégie politique. Bruxelles, Commission européenne. https://ec.europa.eu/home-affairs/sites/homeaffairs/files/10_trends_shaping_migration.pdf
- CEDEFOP. 2020a. *Assessing the employment impact of technological change and automation: the role of employers' practices*. Centre européen pour le développement de la formation professionnelle. www.cedefop.europa.eu/en/publications-and-resources/publications/5579
- CEDEFOP. 2020b. *Digitalisation, AI and the future of work*. Centre européen pour le développement de la formation professionnelle. www.cedefop.europa.eu/en/en/events-and-projects/projects/digitalisation-and-future-work
- CEDEFOP/ETF/UNESCO/UII. 2020. Global inventory of regional and national qualifications frameworks. Centre européen pour le développement de la formation professionnelle / Fondation européenne pour la formation / Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture / Institut de l'UNESCO pour l'apprentissage tout au long de la vie. www.cedefop.europa.eu/en/publications-and-resources/publications/2224-0
- DPC. 2020. What is CPD? Site Web officiel de The CPD Standards Office : www.cpdstandards.com/what-is-cpd
- Dutta, D., Patil, L. et Porter, J. B. Jr. 2012. *Lifelong Learning Imperative in Engineering. Sustaining American Competitiveness in the 21st Century*. Washington, D.C., The National Academies Press. <https://www.nap.edu/read/13503/chapter/1>
- FEANI. 2020. *Policy Guidelines*. Fédération européenne d'associations nationales d'ingénieurs. www.feani.org/feani/cpd/policy-guidelines
- FEM et BCG. 2018. *Towards a reskilling revolution: A future of jobs for all*. Forum économique mondial et Boston Consulting Group. www3.weforum.org/docs/WEF_FOW_Reskilling_Revolution.pdf
- Kirkland, N., Vitanov, V. et Schaefer, D. 2007. An investigation into utilizing current information technologies to provide engineering education to sub-Saharan Africa. Conference Paper. *International Journal of Engineering Education*, vol. 24, n° 2.
- Li, W. 2012. The status and developing strategy of China's Continuing Engineering Education. *Procedia Engineering*, vol. 29, pp. 3815 - 3819.
- ONU. 2020. *Objectifs de développement durable des Nations Unies – 17 objectifs pour transformer notre monde*. Organisation des Nations Unies. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/>
- Singh, S. Sarkar, K. et Bahl, N. 2018. Fourth Industrial Revolution, Indian labour market and Continuing Engineering Education. *International Journal of Research in Engineering, IT and Social Sciences*, vol. 8, n° 3, pp. 6 - 12.
- Trevelyan, J. et Tilli, S. 2011. *Effects of Skilled Migration: Case Study of Professional Engineers*. www.researchgate.net/publication/246026580

5. TENDANCES RÉGIONALES EN MATIÈRE D'INGÉNIERIE





Yuan Si¹

5.1 PRINCIPALES TENDANCES INTERRÉGIONALES



metamorworks/Shutterstock.com

¹ Professeur, Université Tsinghua et Centre international pour l'enseignement de l'ingénierie (ICEE).

Résumé. Bien que l'ingénierie soit une composante essentielle du développement durable, son rôle exact reste difficile à déterminer. Cette section a pour objectif premier d'étudier les tendances interrégionales actuelles en matière d'ingénierie et d'anticiper les défis que nous réserve l'avenir en matière de développement durable. La demande de compétences et de formation en ingénierie varie d'un continent à l'autre. Le présent chapitre examine les disparités en matière de compétences et de possibilités de formation en ingénierie observées au niveau régional et recense les principaux domaines dans lesquels la profession doit renforcer ses capacités éducatives et techniques afin d'atteindre les objectifs spécifiques aux régions qui découlent des Objectifs de développement durable.

Consolidation de la relation entre ingénierie et développement durable et accroissement de la mobilité des ingénieurs grâce à une action internationale

Le Programme de développement durable à l'horizon 2030 des Nations Unies a permis de rassembler la communauté internationale et de partager la vision que proposent les Objectifs de développement durable (ODD), notamment en matière de prospérité économique, d'inclusion sociale et de viabilité environnementale. La réalisation de chacun des 17 ODD et de la plupart de leurs cibles dépend des ingénieurs et de l'ingénierie. La « Déclaration de Paris : faire progresser les ODD des Nations Unies grâce à l'ingénierie », ratifiée par la Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs (FMOI) et l'UNESCO en mars 2018 a rendu explicite cet engagement de l'ingénierie pour le développement durable (FMOI-UNESCO, 2019).

La FMOI est la principale organisation mondiale pour l'ingénierie, représentant plus de 30 millions d'ingénieurs dans près de 100 pays. Elle s'est engagée à faire progresser le Programme 2030 des Nations Unies par le biais de l'ingénierie, avec la création du Plan d'ingénierie 2030 de la FMOI qui est mis en œuvre par ses partenaires et ses membres (encadré 1).

Encadré 1. Projets de la FMOI en faveur de la mobilité des ingénieurs

Dans le cadre du Plan d'ingénierie 2030 de la FMOI, cette dernière a lancé un projet intitulé « Renforcement des capacités des systèmes d'enseignement de l'ingénierie, accréditation et enregistrement pour répondre aux besoins des ingénieurs dans le monde ». Elle travaille en collaboration avec l'International Engineering Alliance, la Federation of Engineering Education Societies (IFEES), le Centre international pour l'enseignement de l'ingénierie, qui est un centre de catégorie II sous les auspices de l'UNESCO (ICEE) et d'autres organisations interrégionales d'ingénieurs afin de garantir une formation d'ingénieur inclusive et d'harmoniser les normes professionnelles, condition préalable à la mobilité mondiale des ingénieurs.

Source : FMOI, 2018.

Rôle croissant des organisations professionnelles d'ingénieurs dans le renforcement des capacités en ingénierie au moyen de partenariats interrégionaux

L'ingénierie a longtemps valorisé la création de partenariats par l'intermédiaire d'organisations professionnelles, tant à l'échelle locale que mondiale. En effet, les partenariats à grande échelle facilitent le partage des connaissances, des compétences, de l'expertise et des ressources entre les pays et les régions en vue d'atteindre les Objectifs de développement par des efforts concertés. Les organisations professionnelles d'ingénieurs ont largement contribué à la création de partenariats et de réseaux interrégionaux en faveur du renforcement des capacités en ingénierie.

La coopération technique et la coopération en matière d'ingénierie, assurées par le biais d'organisations professionnelles d'ingénieurs, ont contribué à la mise en place de diverses collaborations au niveau international, telles que la coopération Nord-Sud, Sud-Sud et triangulaire (encadré 2). Par exemple, en 1978, en Argentine, 138 États membres de l'ONU ont adopté le Plan d'action de Buenos Aires pour la promotion et la mise en œuvre de la coopération technique entre pays en développement, ouvrant ainsi la voie à la coopération Sud-Sud entre pays les moins avancés (ONU, 1978). Aujourd'hui, la collaboration en faveur du renforcement des capacités en ingénierie, en particulier le renforcement de l'infrastructure de connectivité, tient désormais un rôle central en ce qui concerne les ODD. De nombreux partenariats pour le renforcement des capacités en ingénierie ont démontré l'efficacité de la quadruple hélice de l'éducation, du gouvernement, de l'industrie et de la société civile pour mobiliser et partager la valeur, les connaissances, l'expertise, la technologie

et les ressources. Les pays du Sud encouragent de plus en plus la coopération par l'intermédiaire de centres régionaux et internationaux. Les pays d'Asie et d'Afrique, en particulier, ont considérablement élargi leurs réseaux depuis le début du siècle.

Encadré 2. Promotion de la coopération Sud-Sud par l'ISTIC

Établi en 2008 sous les auspices de l'UNESCO, le Centre international pour la coopération Sud-Sud dans le domaine des sciences, de la technologie et de l'innovation (ISTIC) est un centre de catégorie II à Kuala Lumpur, en Malaisie. Il sert de plateforme internationale pour la coopération Sud-Sud dans le domaine de la science et de la technologie de l'innovation dans les pays en développement. Ce centre a pour ambition de faciliter l'intégration d'une approche de développement dans les politiques nationales de sciences, de technologies et d'innovation, en fournissant des conseils stratégiques, en favorisant l'échange d'expériences et de meilleures pratiques, en créant un réseau de centres d'excellence dans les pays en développement et en favorisant la mobilité universitaire et professionnelle entre ces pays.

Source : ISTIC-UNESCO, 2019.

Accélération du développement des infrastructures dans le monde entier grâce à la hausse des investissements et aux progrès de l'ingénierie

L'ingénierie joue un rôle essentiel dans la réalisation du développement durable, notamment parce que la construction d'infrastructures en dépend. Ces infrastructures sont à la fois des infrastructures économiques comme l'électricité, les transports et les télécommunications, et des infrastructures sociales comme l'irrigation, l'assainissement et le logement.

Au cours des dix dernières années, la hausse des investissements dans l'infrastructure, en particulier l'infrastructure de connectivité, est devenue une tendance mondiale majeure. Le lien entre l'infrastructure et le développement est bien établi : l'amélioration de l'infrastructure stimule à la fois la croissance de la productivité totale ainsi qu'une répartition plus équitable des avantages de la croissance ; en revanche, un manque d'infrastructure entrave la croissance et l'égalité (Bai et Qian, 2010 ; Cigu *et al.*, 2019 ; Estache, Wodon et Lomas, 2014 ; Kessides, 1996 ; Rudra *et al.*, 2014 ; Bureau du Conseiller spécial pour l'Afrique, 2015). Par exemple, en Asie, on estime que l'investissement dans le développement des infrastructures s'élève à plus de 26 000 milliards de dollars des États-Unis jusqu'en 2030, soit 1 700 milliards par an, et ce, afin de maintenir la dynamique de croissance asiatique, de lutter contre la pauvreté et de s'adapter aux changements climatiques (Banque asiatique de développement, 2017). Toutefois, en Afrique, où la croissance démographique forte et rapide impose

des exigences toujours plus grandes à l'économie, la société et l'environnement, le développement des infrastructures s'est ralenti de façon disproportionnée. Enfin, à titre d'exemple, citons l'Initiative « La ceinture et la route », qui a permis d'accroître la connectivité physique, numérique, financière et socioculturelle grâce à la construction d'infrastructures, aux transports, au commerce et aux échanges interpersonnels (encadré 3).

Encadré 3. Initiative « La ceinture et la route » et Partenariat mondial dans le cadre de l'Initiative

L'Initiative « La ceinture et la route » a concilié les plans de développement régionaux avec des initiatives de coopération telles que le plan directeur d'interconnexion et l'Association des nations de l'Asie du Sud-Est, l'Agenda 2063 de l'Union africaine, l'Union économique eurasiatique et la Stratégie d'interconnexion de l'Union économique eurasiatique. De plus, plusieurs organismes des Nations Unies, notamment le PNUD, l'UNESCO, l'UNICEF et l'ONUDI, ont très tôt adopté une position forte dans le cadre d'un partenariat stratégique au niveau de l'État et de l'Initiative. Selon la Banque mondiale, le produit intérieur brut (PIB) des pays participant à l'Initiative augmentera jusqu'à 3,4 % ; à l'échelle mondiale, cette hausse sera portée jusqu'à 2,9 % (De Soyres, Mulabdic et Ruta, 2019). Au mois de décembre 2019, la coopération au titre de l'Initiative regroupe 136 pays et 30 organisations internationales ; elle a contribué à la création de 300 000 emplois ; et elle a généré des échanges commerciaux d'une valeur de plus de 6 000 milliards ainsi que plus de 2 milliards de dollars des États-Unis en taxes payées au pays hôte dans la période 2013-2018 (Belt et Road Portal, 2019).

Essor de la science et de l'ingénierie au service du développement durable et des ODD

La science de la durabilité s'est considérablement développée au vingt-et-unième siècle afin de faire face aux défis mondiaux (Bettencourt et Kaur, 2011). Plus particulièrement, on constate quatre tendances importantes pour les sciences et l'ingénierie dans le contexte du développement durable (encadré 4) :

- Les connaissances interdisciplinaires, transversales et transdisciplinaires dépassent les frontières traditionnelles afin de permettre une approche plus globale.
- L'entrepreneuriat, principalement sous la forme d'un techno-entrepreneuriat, se définit comme la capacité d'ajouter de la valeur en produisant des connaissances polyvalentes qui intègrent et synthétisent des éléments théoriques, pratiques et politiques.
- L'élargissement de la notion de diversité englobe désormais l'inclusivité pour tous, impliquant non seulement les groupes traditionnellement défavorisés, notamment en raison de leur sexe ou de leur origine socioéconomique, mais aussi

les caractéristiques personnelles telles que les conditions physiques et les identités ethniques et culturelles.

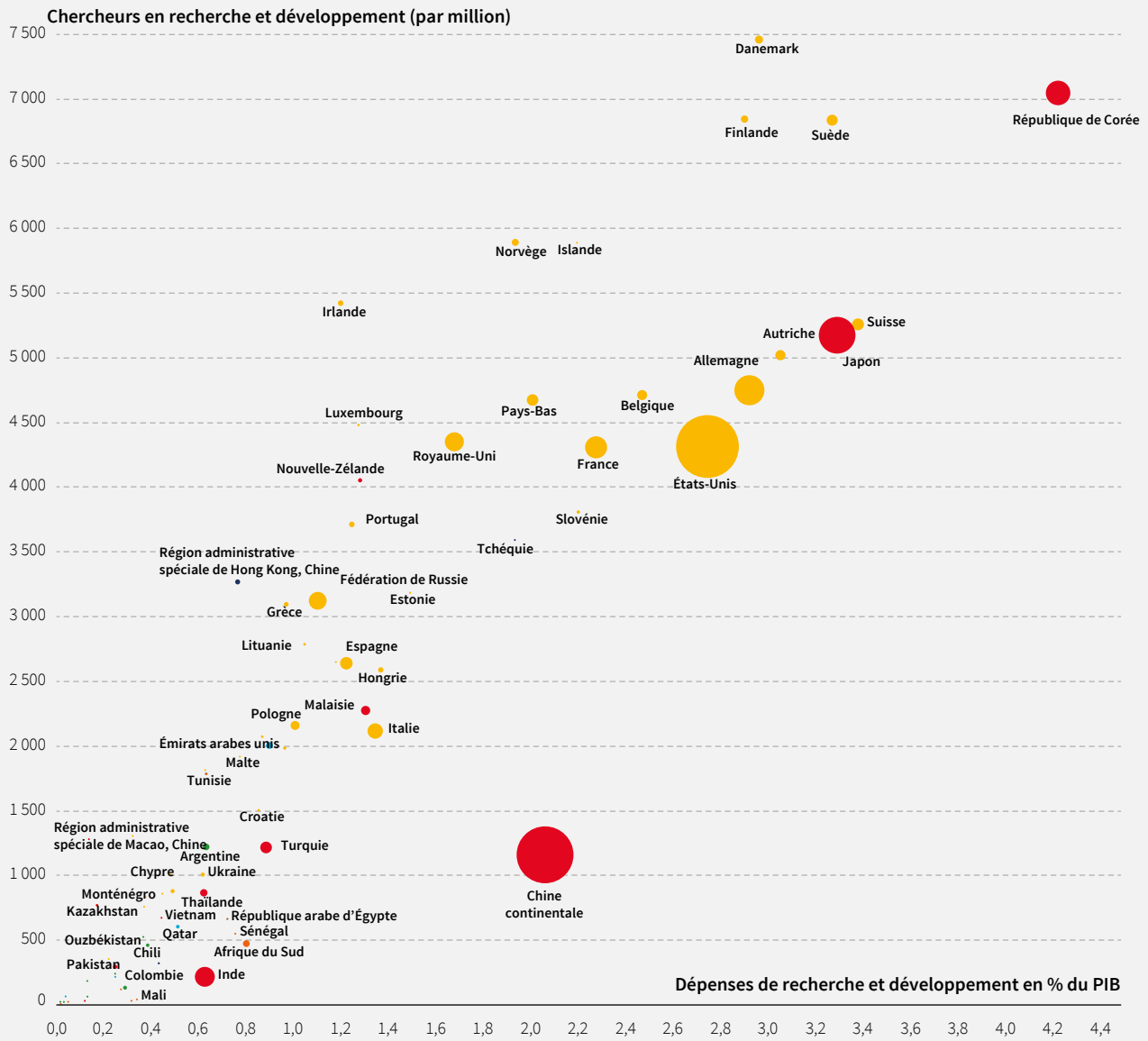
- Le bien-être humain et le bien-être écologique sont indissociables. En adoptant une approche plus sensible, globale et prudente des changements apportés par l'homme à l'environnement naturel de la Terre, l'ingénierie permet d'éviter un « changement d'état » dangereux et irréversible des écosystèmes.

Ces tendances favorisent le développement de l'ingénierie dans le contexte du développement durable de manière à élargir la portée et l'échelle de ses disciplines, domaines et réalisations pratiques, tout en facilitant une plus grande interaction entre l'ingénierie et les autres sciences et arts afin de promouvoir la durabilité.

Encadré 4. Collaboration mondiale dans les villes saines

Selon le rapport *Healthy Cities: Unlocking the Power of Cities for a Healthy China* de la revue *The Lancet* (Yang et al., 2018), la notion de ville saine fait référence à une collaboration physique et sociale saine à travers de multiples aspects qui assurent l'accès au logement, au bien-être et à la santé publique, ainsi que l'accès aux ressources naturelles, la relation au patrimoine culturel, etc. Le rapport préconise la notion de développement urbain axé sur la santé en tant qu'approche fondamentale de la lutte contre les problèmes de santé urbaine dans le contexte d'un développement urbain accéléré et dynamique en Chine, ainsi que dans de nombreuses zones densément peuplées des pays développés et en développement. Il invite notamment les urbanistes à « intégrer la santé dans l'ensemble des politiques en augmentant la participation du public, en fixant des objectifs locaux adaptés, en évaluant périodiquement les progrès accomplis et en renforçant la recherche et l'éducation sur les villes saines ». Ce rapport constitue un modèle à suivre en matière de science et d'ingénierie dans le contexte du développement durable. Son élaboration est le fruit des efforts entrepris par la commission dirigée par le professeur Peng Gong de l'Université Tsinghua, composée d'une équipe interdisciplinaire de 45 chercheurs et experts du monde entier, provenant notamment de la Commission nationale de la santé, de l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) et de l'Université de Californie.

Figure 1. Dépenses affectées à la recherche et au développement en % du PIB (dépenses brutes en recherche et développement) et nombre de chercheurs par million d'habitants, 2018



GERD PPP USD
 • 3 000 ● 100 000 000 ● 200 000 000 ● 300 000 000 ● 400 000 000 ● 500 000 000

Région de l'UNESCO
 ● Afrique ● États arabes ● Asie-Pacifique ● Europe et Amérique du Nord ● Amérique latine et Caraïbes ● Non membre de l'UNESCO

Source : ISU et ICEE, 2019.

Accentuation des disparités régionales concernant les ressources disponibles en matière d'ingénierie

La recherche et le développement, terme qui désigne les travaux visant à mettre au point de nouveaux produits ou services ou à améliorer des produits ou services existants, constitue un indicateur clé du renforcement des capacités dans le domaine de l'ingénierie. Entre les différentes régions du monde, on constate de fortes disparités en matière de recherche et de développement sur le plan des dépenses et des ressources humaines. Ces disparités se sont notamment creusées lors des dix dernières années (ISU, 2019) (figure 1). Le diamètre des cercles indique les montants que les pays consacrent à la recherche et au développement en dollars des États-Unis en parités de pouvoir d'achat (PPA). Les pays qui apparaissent en bas de la figure disposent d'un nombre inférieur de chercheurs par million d'habitants. Cela concerne la majorité des pays africains.

Pénuries persistantes d'ingénieurs hautement qualifiés dans les pays en développement

Les changements structurels de l'économie mondiale ont entraîné une expansion du marché du travail, tant sur le plan de l'ampleur que de la nature des activités de l'industrie et des services (figure 2). L'un des principaux moteurs est le progrès scientifique et technologique rapide qui soutient la quatrième révolution industrielle. La disponibilité d'ingénieurs hautement qualifiés est donc essentielle pour satisfaire aux besoins croissants du marché du travail.

Toutefois, ces exigences ne peuvent être satisfaites de manière adéquate en raison d'une pénurie d'ingénieurs. Malgré l'expansion continue de l'enseignement supérieur dans la plupart des régions du monde, dans de nombreux pays, de moins en moins de jeunes envisagent d'embrasser une carrière dans le domaine de l'ingénierie. Si l'on en croit les données disponibles (la Chine et l'Inde, entre autres, présentent des données manquantes), depuis 2013, l'ingénierie est passée du deuxième au troisième rang parmi les formations les plus prisées, et ce malgré la hausse constante du nombre d'étudiants dans les programmes d'ingénierie (figure 3). Cela signifie que certains étudiants ne choisissent pas d'étudier l'ingénierie.

Figure 2. Emploi par secteur, estimations modélisées de l'OIT, 1991-2020*

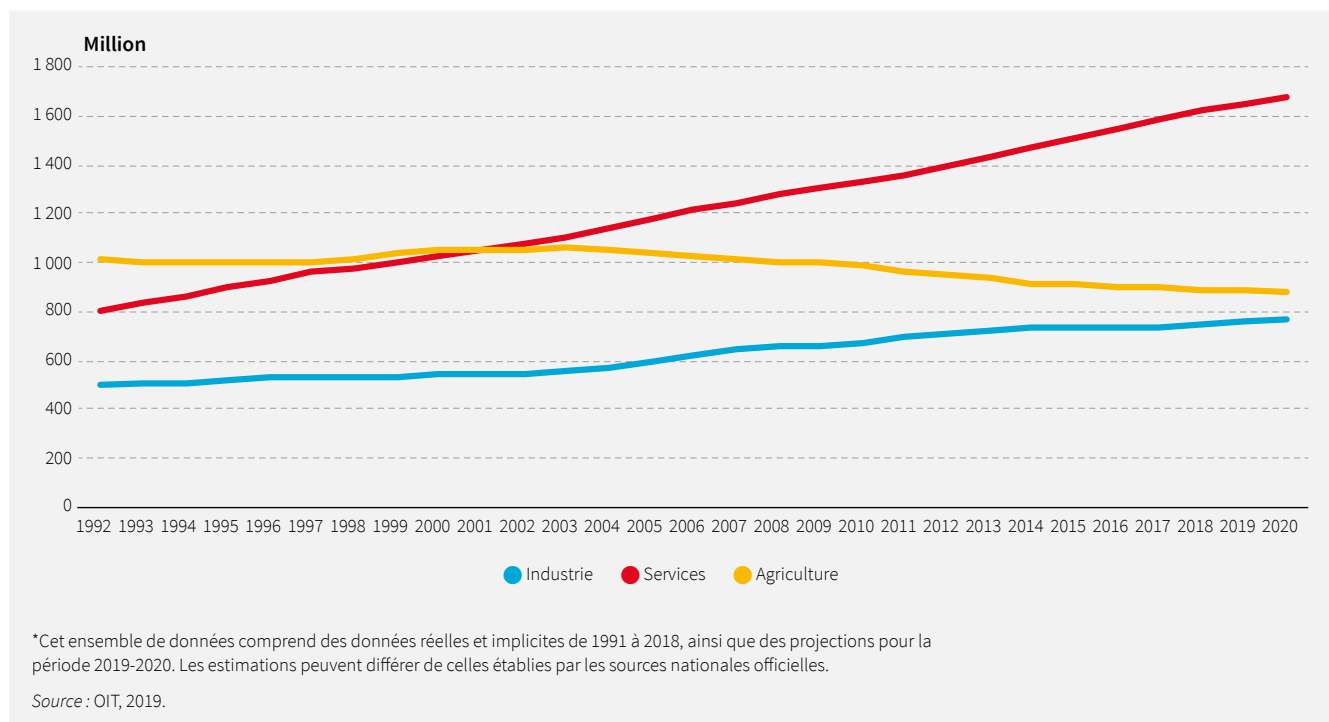
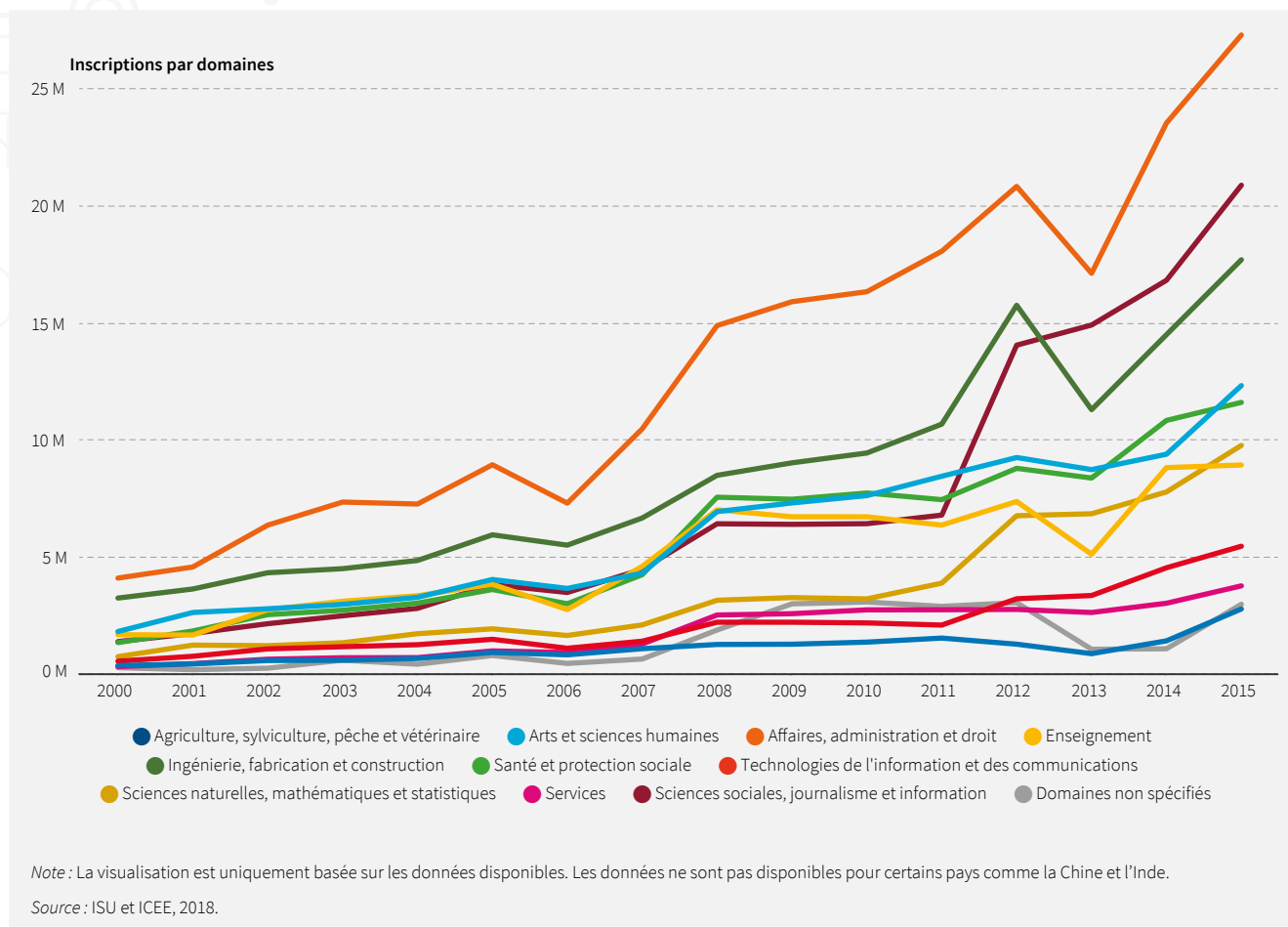


Figure 3. Inscriptions dans l'enseignement supérieur par domaine, tous programmes confondus, 2000-2015



Recommandations

1. Renforcement de la coopération interrégionale, régionale et sous-régionale, sous toutes ses formes, afin d'améliorer les capacités en ingénierie conformément aux principes de développement durable, notamment en mettant l'accent sur les aspects liés à l'ingénierie dans tous les Objectifs de développement durable, les normes inclusives, la mobilité des ingénieurs et l'articulation du lien entre l'ingénierie et l'enseignement.
2. Normalisation de l'enseignement de l'ingénierie dans le monde entier et innovation, en particulier dans les pays en développement, et promotion des compétences en matière de durabilité pour tous les ingénieurs par l'apprentissage et la formation tout au long de la vie.
3. Mise en place de systèmes favorisant la diversité dans l'ingénierie, et stimulation des jeunes, en particulier les femmes et les filles, à embrasser des carrières d'ingénieurs. Soutien de tous les ingénieurs, en particulier les femmes, pour qu'ils puissent exercer dans le domaine de l'ingénierie tout au long de leur vie.
4. Préservation du bien-être humain et de la résilience écologique en favorisant une approche inclusive de la construction d'infrastructures dans le domaine de l'ingénierie.
5. Création d'organisations professionnelles d'ingénieurs pérennes en vue de soutenir le potentiel de l'ingénierie et d'en tirer avantage, notamment en renforçant les capacités en matière de collecte et d'analyse des données, de surveillance et de reddition de comptes grâce à la production de rapports sur l'ingénierie.

Références

- Bai, Chong-En et Qian, Yingyi. 2010. Infrastructure development in China: The cases of electricity, highways, and railways. *Journal of Comparative Economics*, vol. 38, n° 1, pp. 34 - 51.
- BASD. 2017. Meeting Asia's infrastructure needs. Mandaluyong Philippines, Banque asiatique de développement. www.adb.org/publications/asia-infrastructure-needs
- Belt et Road Portal. 2019. BRI facts and figures. <https://www.beltroad-initiative.com/factsheets/>
- Bettencourt, L.M.A. et Kaur, J. 2011. Evolution and structure of sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, vol. 108, n° 49, pp. 19540 - 19545. <https://www.pnas.org/content/108/49/19540>
- Bureau du Conseiller spécial des Nations Unies pour l'Afrique. 2015. *Infrastructure development: Within the context of Africa's cooperation with new and emerging development partners*. Bureau du Conseiller spécial des Nations Unies pour l'Afrique. www.un.org/en/africa/osaa/pdf/pubs/2015infrastructureanddev.pdf
- Cigu, E., Agheorghiesei, D.T., Gavriluta, V., Anca, F. et Toader, E. 2019. Transport infrastructure development, public performance and long-run economic growth: A case study for the EU-28 countries. *Sustainability*, vol. 11, n° 1, p. 67. www.mdpi.com/2071-1050/11/1/67
- De Soyres, F., Mulabdic, A. et Ruta, M. 2019. Common transport infrastructure: A quantitative model and estimates from the Belt and Road Initiative. *World Bank Policy Research Working Papers*. Avril. <http://hdl.handle.net/10986/31496>
- Estache, A., Wodon, Q. Lomas, K. 2014. *Infrastructure and Poverty in sub-Saharan Africa*. Plagrave McMillan, États-Unis.
- FMOI. 2018. *WFEO Engineering 2030: A Plan to advance the achievement of the UN Sustainable Development Goals through engineering*. Rapport d'activité n° 1. Projet de collaboration entre la Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs et la Division des politiques scientifiques et du renforcement des capacités, Secteur des sciences exactes et naturelles de l'UNESCO. http://www.wfeo.org/wp-content/uploads/un/WFEO-ENgg-Plan_final.pdf
- ISTIC-UNESCO. 2019. À propos du Centre international pour la coopération Sud-Sud dans le domaine des sciences, de la technologie et de l'innovation. Centre international pour la coopération Sud-Sud dans le domaine des sciences, de la technologie et de l'innovation sous les auspices de l'UNESCO. www.istic-unesco.org/index.php/features/module-positions
- ISU et ICEE. 2018. Données de l'ISU. Institut de statistique de l'UNESCO. <http://uis.unesco.org/fr/news/la-publication-de-donnees-r-d>
- ISU et ICEE. 2019. Données de l'ISU. Institut de statistique de l'UNESCO. <http://data.uis.unesco.org/index.aspx?lang=fr&SubSessionId=20e434cd-bf57-4f2b-afdf-d443bcbb392d&themetreeid=-200>
- Kessides, C. 1996. A review of infrastructure's impact on economic development. Dans : D.F. Batten, et C Karlsson (dir. publ.). *Infrastructure and the Complexity of Economic Development*. Berlin, Springer, pp. 213 - 230.
- OIT. 2019. *Emploi et questions sociales dans le monde*. Genève, Organisation internationale du travail. www.ilo.org/wesodata
- ONU. 1978. *Plan d'action de Buenos Aires*. Organisation des Nations Unies, 12 septembre. <https://www.unsouthsouth.org/bapa40/documents/buenos-aires-plan-of-action/>
- Rudra, P.P., Mak, B.A., Neville, R.N. et Samadhan, K.B. 2014. Economic growth and the development of telecommunications infrastructure in the G-20 countries: A panel-VAR approach. *Telecommunications Policy* vol. 38, n° 7, pp. 634 - 649.
- Yang, J., Siri, J.G., Remais, J.V., Cheng, Q., Zhang, H. et al. 2018. The Tsinghua-Lancet Commission on Healthy Cities in China: Unlocking the power of cities for a healthy China. *The Lancet*, vol. 391, n° 10135. www.thelancet.com/commissions/healthy-cities-in-China

Milda Pladaitė² and Philippe Pypaert³

5.2 EUROPE ET AMÉRIQUE DU NORD



© Loughborough University

Engineering student experiment

- 2 Institution des ingénieurs civils du Royaume-Uni, membre des jeunes ingénieurs de la FMOI/Comité de Future Leaders.
- 3 Département des sciences naturelles, Bureau de l'UNESCO à Beijing.

Progrès et défis pour la réalisation des ODD

Les pays d'Europe et d'Amérique du Nord⁴ affichent de bons progrès dans de nombreux domaines du développement durable, notamment en ce qui concerne les Objectifs de développement durable visant à offrir de meilleures conditions de vie aux populations. Toutefois, dans d'autres domaines, tels que la transition vers une économie circulaire/faible en carbone, il reste encore beaucoup à faire pour les atteindre.

Les pays de l'Union européenne et le Canada ont pour ambition d'être neutres sur le plan climatique d'ici à 2050. En Europe et en Amérique du Nord, la proportion des subventions aux combustibles fossiles par rapport au PIB est proche de zéro. Des efforts ont été faits pour soutenir le recyclage et réduire l'utilisation des ressources en combustibles fossiles pour la production d'énergie grâce à des initiatives d'économie circulaire, comme le Plan d'action pour l'économie circulaire (Commission européenne, 2020)⁵ dans l'UE ou la gestion durable des matériaux⁶ aux États-Unis.

Le système de l'économie circulaire est en train de remodeler l'industrie de haute technologie, car de nouvelles approches de la conception durable des produits apparaissent dans de nombreux secteurs. La part de la valeur ajoutée provenant de l'industrie de moyenne et haute technologie augmente, contribuant de 30 à 50 % à la valeur ajoutée totale en Europe occidentale et centrale et en Amérique du Nord (CEE-ONU, 2020, p. 65). Cela montre à quel point le développement et le progrès des technologies, ainsi que la promotion de nouvelles idées, contribuent à l'économie.

Le développement technologique et les transitions vertes et numériques sont fortement influencés par la COVID-19. La crise sanitaire qui en découle constitue un défi majeur, qui a également eu des répercussions sociales et économiques importantes. C'est pourquoi l'UE a approuvé le plus grand plan de relance jamais financé par son budget de 1 800 milliards d'euros. Parmi les principaux domaines auxquels plus de la moitié des dépenses seront allouées, citons la recherche et l'innovation, ainsi que le climat équitable et la transition vers le numérique. L'égalité des sexes est également l'un des principaux éléments de ce plan d'investissement⁷.

Les pays se sont engagés à augmenter considérablement les dépenses publiques et privées de recherche et développement afin d'accélérer la réalisation des ODD. Le domaine de la recherche

et du développement est l'une des priorités de la région, car elle permet de mettre en place des économies durables, compétitives et inclusives. Bien que l'Amérique du Nord et l'Europe occidentale soient actuellement en tête sur le plan des dépenses de recherche et développement, les pays d'Asie, menés par la Chine, pourraient bientôt les dépasser. On observe également une augmentation du nombre d'acteurs émergents qui accroissent régulièrement leurs investissements et le nombre de chercheurs. Les entreprises de l'UE représentent environ 20 % des plus grandes sociétés de recherche et développement. Toutefois, nombre d'entre elles sont à la traîne dans l'adoption des technologies numériques, notamment dans le secteur de la construction et pour les technologies de l'Internet des objets (BEI, 2020). L'intensité des dépenses de recherche et développement de l'UE est également à la traîne (Commission européenne, 2017) : 2 % dans l'UE contre 2,1 % en Chine, 2,8 % aux États-Unis et 2,4 % de la moyenne de l'OCDE. La part mondiale des licornes⁸ créées dans l'UE depuis 2011 n'est que de 11 % contre 51 % aux États-Unis et 25 % en Chine (Table ronde des industriels européens, 2020).

Dans le cadre de son programme de recherche et d'innovation « Horizon Europe », doté de 100 milliards d'euros, la Commission européenne a défini cinq grands domaines d'intérêt : i) l'adaptation au changement climatique, y compris la transformation de la société ; ii) le cancer ; iii) les villes intelligentes et neutres au niveau climatique ; iv) la santé des océans, des mers, des eaux côtières et intérieures ; et v) la santé des sols et l'alimentation⁹.

Comme nous le verrons dans les paragraphes suivants, le contexte de développement régional en Europe et en Amérique du Nord se caractérise non seulement par des préoccupations environnementales croissantes, mais aussi par les opportunités liées à la transformation numérique. Ces tendances affectent la formation des ingénieurs et le marché du travail. Des données statistiques précises et actualisées sont nécessaires pour étudier la manière dont les nouveaux emplois prévus correspondent à la main-d'œuvre actuelle des ingénieurs et au nombre de diplômés en ingénierie qui devraient entrer sur le marché du travail. Toutefois, il n'existe pas d'approche commune pour l'enregistrement des données sur les professions d'ingénieur en Europe et entre l'Europe et l'Amérique du Nord. L'ingénierie est un secteur d'éducation et d'activités professionnelles très diversifié et les faits et tendances suivants sont donc présentés séparément pour le Canada, les États-Unis et l'Europe.

4 Les tendances et les faits présentés ne prennent pas en compte l'ensemble des effets de la COVID-19 en raison de l'évolution de la situation.

5 Pour plus de renseignements : <https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12095-A-new-Circular-Economy-Action-Plan>

6 Pour plus de renseignements : <https://www.epa.gov/smm>

7 Vous pouvez consulter les principaux éléments de cet accord en cliquant sur le lien suivant : https://ec.europa.eu/info/strategy/recovery-plan-europe_fr#main-elements-of-the-agreement

8 Une licorne est une start-up valorisée à plus d'un milliard de dollars des États-Unis.

9 Pour plus de renseignements sur Horizon Europe : https://ec.europa.eu/info/horizon-europe_en

Encadré 1. Le rôle des organisations d'ingénieurs dans la création de définitions et de statistiques harmonisées

La présentation de statistiques harmonisées relatives à l'ingénierie en Europe est une tâche difficile, car les informations disponibles varient considérablement d'un pays européen à l'autre. Cette complexité est démontrée par l'incohérence des définitions, des disciplines d'ingénierie et les différences des données de mesure. Dans un tel contexte, une étude sur le cadre commun de formation pour les ingénieurs civils a été menée par les organisations européennes d'ingénierie. Selon le Conseil européen des chambres d'ingénieurs (ECEC), l'objectif du projet était de permettre aux acteurs dans le domaine des qualifications professionnelles (par exemple les organisations professionnelles ou les autorités compétentes des États membres de l'UE) de présenter des propositions de principes de formation communs pour la profession d'ingénieur afin que ceux-ci soient développés dans un cadre de formation commun. Les propositions ont été élaborées sur la base d'une cartographie réalisée dans les États membres, ainsi qu'après une large consultation des parties prenantes concernées.

Le projet a conclu qu'il n'est pas possible de trouver une approche acceptable pour tous les pays de l'Espace économique européen (EEE) ou même pour une grande majorité d'entre eux. Afin de sortir de l'impasse et de progresser vers un principe de formation commun pour les ingénieurs – ce que la majorité des parties prenantes souhaitent malgré toutes les controverses – quelques approches à court et à long terme ont été suggérées. Le cadre commun de formation pour les ingénieurs civils avec un nombre limité d'États membres pourrait être initié en premier lieu, tandis qu'une approche commune acceptable à long terme pour la grande majorité des États membres de l'EEE pourrait être trouvée.

Source : <https://www.ecec.net/activities/common-training-principles-for-engineers/news-log/>

Plusieurs auteurs tentent d'estimer les effets de la numérisation sur l'emploi et prévoient différents ratios entre les nouveaux emplois créés et les emplois qui seront remplacés par les nouvelles technologies (Parlement européen, 2018). Cela suggère clairement que les professionnels des sciences et de l'ingénierie pourraient connaître l'un des plus grands changements sur le marché du travail. Par exemple, dans la transition énergétique, ces professionnels devraient avoir les taux les plus élevés à la fois d'emplois détruits, non réaffectés, et de nouveaux emplois absorbant des travailleurs licenciés, comme l'illustre la figure 1.

Certains pays recrutent des ingénieurs étrangers. Cela permet de résoudre les problèmes de recrutement à court terme et d'accroître la diversité, la créativité et la compétitivité d'une entreprise. Cependant, cela ne résout pas le problème actuel de la pénurie de main-d'œuvre dans le secteur de l'ingénierie.

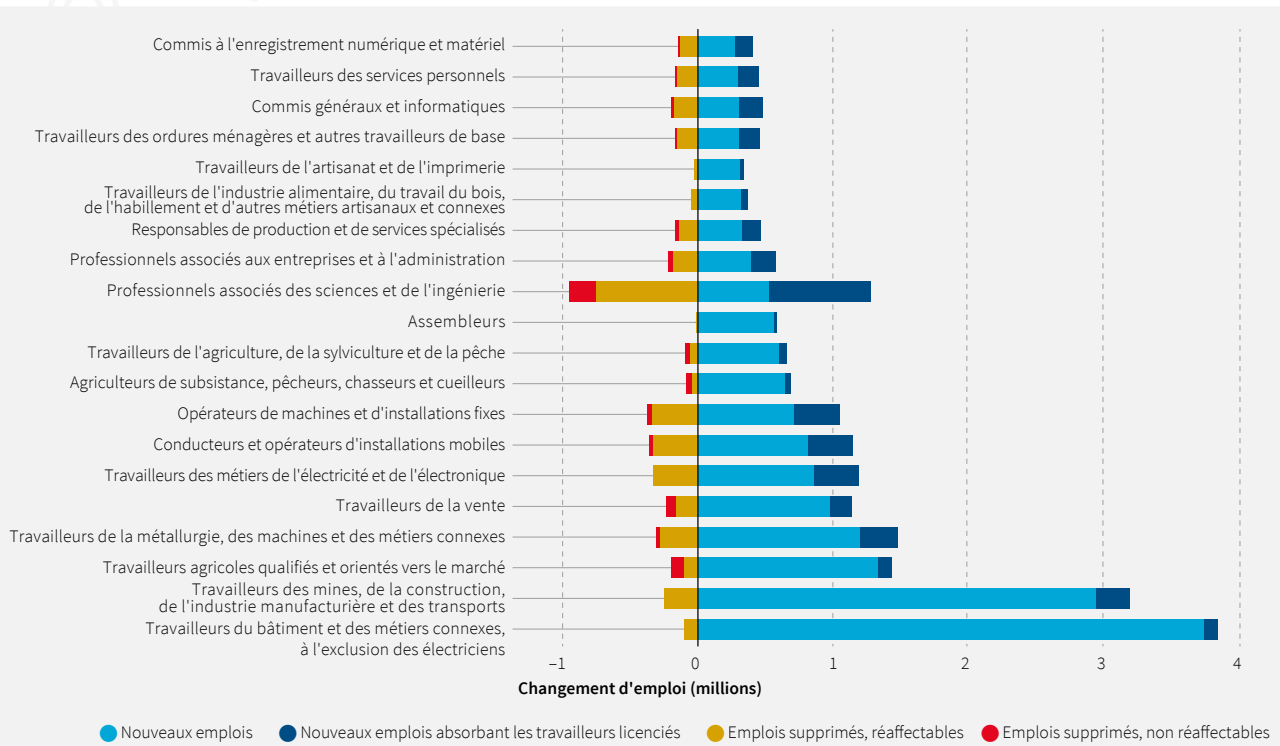
Un marché du travail en mutation dans le domaine de l'ingénierie

Partout dans le monde, les professionnels qualifiés sont très demandés et l'on constate une grande pénurie d'ingénieurs dans de nombreux pays d'Europe et d'Amérique du Nord. La situation actuelle est aggravée par les changements démographiques, tels que le vieillissement de la population en Europe et en Amérique du Nord.

Selon la Commission européenne, la transition vers une économie circulaire, numérisée, à faible intensité de carbone et économe en ressources pourrait créer plus d'un million de nouveaux emplois en Europe d'ici à 2030 (Commission européenne, 2020a). Déjà en 2017, la Commission européenne a signalé que plus de la moitié des entreprises de l'UE qui recrutaient ou tentaient de recruter des spécialistes de l'information et de la communication avaient des difficultés à pourvoir les postes vacants dans ce domaine¹⁰.

10 Eurostat Statistics Explained : https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/ICT_specialists_-_statistics_on_hard-to-fill_vacancies_in_enterprises

Figure 1. Professions les plus prisées dans les différents secteurs dans un scénario de durabilité énergétique mondiale, 2030.



Note : Différence en matière d'emploi entre le scénario d'énergie durable (le scénario des 2 °C) et le scénario de maintien du statu quo (le scénario des 6 °C) de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) d'ici à 2030 (OIT, 2018a). Des informations détaillées sur la méthodologie sont décrites dans ILO, 2018a, pp. 39, 172-170.

Source : OIT. 2019. Skills for a greener future: A global view based on 32 country studies. Genève, Organisation internationale du travail.

Canada

Selon Statistics Canada, les services professionnels, scientifiques et techniques ont poursuivi leur croissance accélérée de l'emploi de 2017 à 2018. Le nombre d'employés dans ce secteur a augmenté de 4,5 %, le taux le plus rapide parmi les dix plus grands secteurs industriels. Parallèlement, le taux d'emploi vacant dans ce secteur a augmenté entre 2017 et 2018 (Statistics Canada, 2018). La moitié de la croissance annuelle de l'emploi est venue de l'industrie de la conception de systèmes informatiques et des services connexes, bien qu'elle représente environ un quart de l'emploi dans ce secteur. Cette industrie a également connu la croissance la plus rapide au sein du secteur, suivie par les services de recherche et de développement scientifiques, et les services d'architecture, d'ingénierie et les services connexes (Statistics Canada, 2018).

États-Unis

Selon le Bureau américain des statistiques du travail, l'emploi dans les professions de l'ingénierie et de l'architecture devrait croître de 3 % entre 2019 et 2029, soit à peu près aussi vite que la moyenne de toutes les professions (Bureau américain des statistiques du travail, 2020). On s'attend à ce qu'environ 23 % des nouveaux postes vacants dans la profession d'ingénieur soient occupés par des ingénieurs civils. On prévoit également une croissance de l'emploi dans le secteur de l'ingénierie mécanique et industrielle. Ces deux professions pourraient représenter environ 36 % des nouveaux emplois d'ingénieurs entre 2016 et 2026 (Bureau américain des statistiques du travail, 2018).

Europe

Le nombre de scientifiques et d'ingénieurs âgés de 25 à 64 ans dans l'Union européenne a augmenté de 10 % entre 2016 et 2019¹¹. Leur nombre total était estimé à 17,2 millions en 2018¹², ce qui représente 23 % de tous les travailleurs employés dans les professions scientifiques et technologiques dans l'UE. Un grand nombre des emplois que les employeurs devront peut-être pourvoir d'ici à 2030 exigeront un niveau de compétences plus élevé. Le plus grand nombre (4 millions) devrait comprendre des emplois qui n'existent pas encore, souvent créés grâce aux nouvelles technologies (un éthicien de l'intelligence artificielle, par exemple), tandis que 2,6 millions de nouveaux emplois prévus concernent des professionnels des sciences et de l'ingénierie (McKinsey Global Institute, 2020).

Tendances en matière d'ingénierie dans l'enseignement supérieur et d'apprentissage tout au long de la vie

L'enseignement est essentiel en vue d'accélérer la réalisation des ODD. Les grandes tendances, telles que les transitions vertes et numériques, remodelent également le paysage de l'ingénierie et les exigences en matière d'éducation. Le système d'enseignement de l'ingénierie doit être réévalué et passer entièrement à la résolution de problèmes technologiques avec une approche globale prenant en compte les effets des innovations et des activités d'ingénierie sur l'environnement et sur la société en général.

En Europe et en Amérique du Nord, il existe un besoin et une reconnaissance croissants d'ingénieurs tournés vers l'avenir et possédant des compétences interdisciplinaires. Si les ingénieurs continuent d'être des « solutionneurs de problèmes technologiques », ils sont aussi plus souvent considérés comme des communicateurs et des médiateurs. Ils soutiennent les processus décisionnels et s'engagent auprès d'une grande variété d'acteurs, des communautés locales aux décideurs politiques. On attend des ingénieurs qu'ils travaillent au sein d'équipes multidisciplinaires et qu'ils possèdent une aptitude à écouter toutes les parties prenantes et à intégrer leurs points de vue dans les solutions proposées. Les compétences relationnelles, telles que la capacité d'adaptation au changement, la créativité et la flexibilité, sont très demandées, comme l'illustre la figure 2.

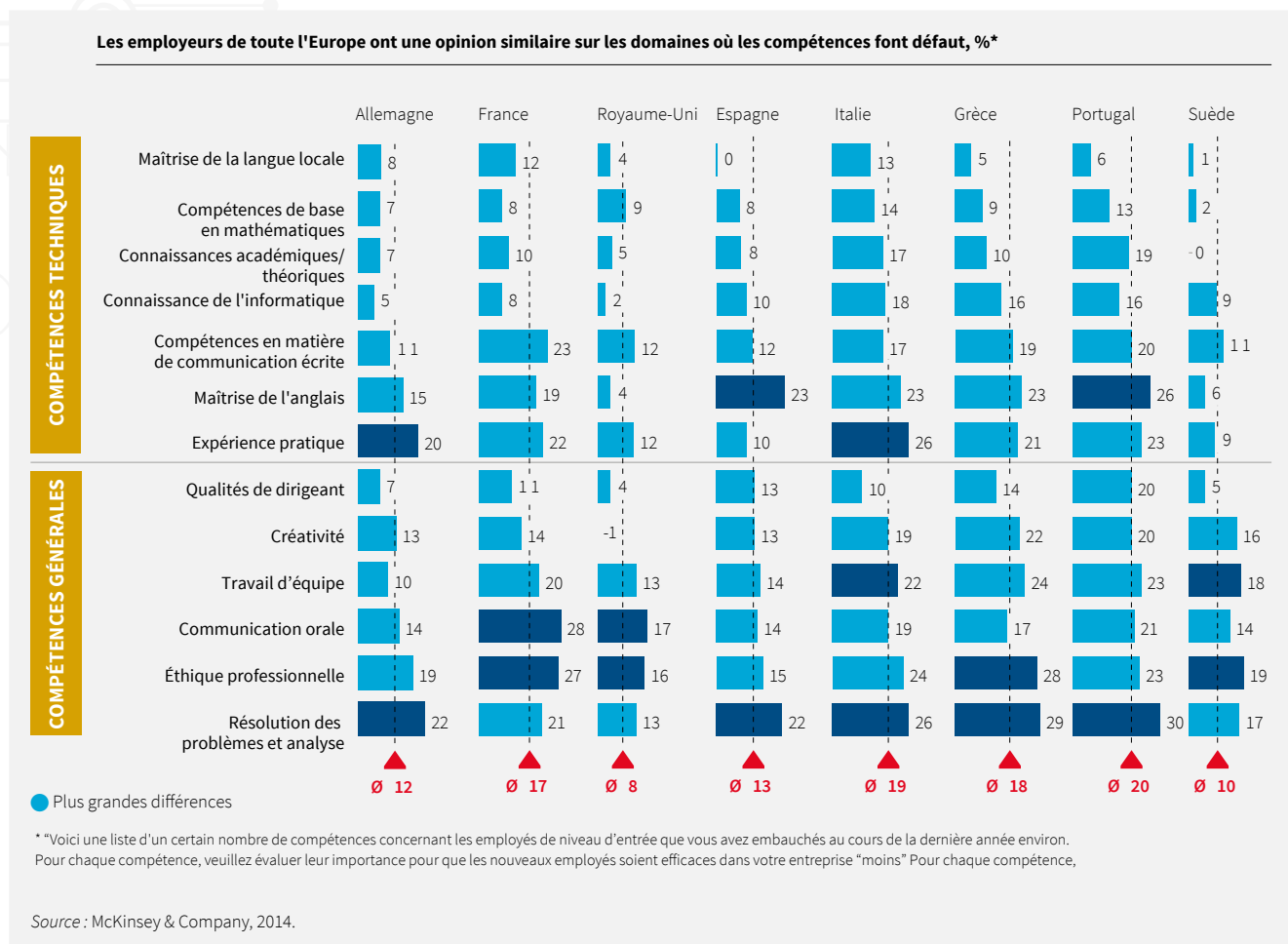
Les transitions vertes et numériques exigeront une amélioration des compétences en matière de nouvelles technologies et de nouveaux processus, notamment le bâti immobilier modélisé, l'informatique en nuage, l'intelligence artificielle, l'impression 3D, la réalité virtuelle, l'IdO et la technologie des chaînes de blocs (EFCA, 2018). Des approches multidisciplinaires du développement technologique sont également nécessaires afin de disposer de réseaux de communication socialement responsables et de systèmes de gouvernance urbaine¹³. Le nombre de diplômés et d'apprentis ingénieurs en Europe et en Amérique du Nord est en augmentation. Cependant, le taux d'augmentation actuel pourrait ne pas être suffisant pour correspondre aux nouveaux emplois créés dans la prochaine décennie et au-delà.

11 Eurostat : http://bit.ly/eu_scientists_engineers

12 Eurostat : http://bit.ly/number_of_scientists

13 Pour en savoir plus sur « concevoir un futur numérique plus responsable » : <https://fr.weforum.org/agenda/2018/03/concevoir-un-futur-numerique-plus-responsable>

Figure 2. Les employeurs européens ont une opinion similaire sur les domaines dans lesquels les compétences font défaut



Canada

Selon Statistics Canada, de 2006 à 2016, la plus grande proportion de diplômés en sciences, technologie, ingénierie et mathématiques avait étudié l'ingénierie ou la technologie de l'ingénierie (47,9 %) (Franck, 2019). On observe une croissance continue des diplômes de premier cycle délivrés, présentant 18,9 % de plus de diplômés d'ingénieur en 2018 qu'en 2014. Les disciplines d'ingénierie de premier cycle les plus représentées en 2018 sont l'ingénierie mécanique, l'ingénierie civile et l'ingénierie électrique. L'ingénierie des biosystèmes, l'ingénierie des logiciels et l'ingénierie industrielle ou manufacturière ont connu la plus forte croissance depuis 2017 (Engineers Canada, 2020b).

États-Unis

Les inscriptions dans les programmes d'ingénierie de premier cycle ont augmenté au cours de la dernière décennie. L'étude *Engineering by the Numbers* (Roy, 2019) révèle que les trois premières disciplines d'ingénierie pour les licences en 2018 sont l'ingénierie mécanique, l'informatique (ingénierie interne) et l'ingénierie électrique. On a également constaté une augmentation en 2018 des inscriptions aux programmes de master en ingénierie dans ces trois mêmes disciplines, représentant 39 % de tous les diplômés de master en ingénierie (Roy, 2019).

Europe

Dans l'Union européenne, plus d'un cinquième (22 %) de tous les étudiants de l'enseignement supérieur en 2018 étudiaient le commerce, l'administration ou le droit. Le deuxième domaine d'enseignement le plus fréquent était l'ingénierie, la fabrication et les études liées à la construction, qui représentaient 15,8 % de tous les étudiants de l'enseignement supérieur (une augmentation par rapport à 15 % en 2017), dont près des trois quarts (11,6 %) étaient des hommes contre 4,2 % de femmes¹⁴.

14 Statistiques sur l'enseignement tertiaire : https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Tertiary_education_statistics#Fields_of_education

Prise en compte de l'égalité des genres et de la diversité

L'augmentation de la diversité dans l'enseignement supérieur et sur le marché du travail est importante pour la justice sociale, le renforcement de la créativité et des capacités de résolution des problèmes dans cette profession mondialisée, mais également dans l'optique de remédier à la pénurie d'ingénieurs (voir chapitre 2, Égalité des chances pour tous).

On observe un nombre croissant de femmes dans le secteur de l'ingénierie dans toute la région et une légère augmentation des populations indigènes dans l'ingénierie en Amérique du Nord. En dépit de la hausse de la représentation des femmes à un rythme plus rapide que celui des autres groupes, les objectifs fixés par certains pays n'ont pas été atteints (Engineers Canada, 2020a). D'autres groupes sous-représentés, notamment les LGBTQ+¹⁵ et les populations indigènes, sont tout aussi importants dans l'intégration de la diversité. Les organisations nationales et les institutions éducatives et gouvernementales fournissent davantage d'efforts pour promouvoir une représentation complète de la société dans le domaine de l'ingénierie.

Canada

Les femmes représentent 14 % de l'ensemble des ingénieurs à l'échelle nationale en 2019 (contre 13,5 % en 2018) et 17,9 % des ingénieurs nouvellement diplômés au Canada en 2019. Dans le cadre de l'initiative 30 by 30¹⁶, Engineers Canada et les organismes de réglementation suivent le nombre de femmes nouvellement diplômées depuis 2014. Cette initiative est le fruit d'une collaboration entre les organisations d'ingénieurs, l'industrie et les organismes de réglementation, visant à accroître la proportion de femmes nouvellement diplômées dans le domaine de l'ingénierie de 30 % d'ici à 2030. La représentation des étudiants en ingénierie qui s'identifient comme des femmes est passée de 23,7 % à 25,2 % entre 2018 et 2019 (Engineers Canada, 2020a). Les étudiants indigènes sont encore largement sous-représentés dans l'enseignement de l'ingénierie, ne représentant que 0,5 % des étudiants de premier cycle déclarés. Ce chiffre est environ dix fois inférieur aux 4,9 % de personnes au Canada qui s'identifient comme indigènes (Statistics Canada, 2018).

États-Unis

La proportion de femmes diplômées en licence, master et doctorat en ingénierie et en technologie de l'ingénierie est toujours à la hausse. Toutefois, elle n'a augmenté que de quelques pour cent en moyenne entre 2009 et 2017 (Roy, 2019). En 2018, les femmes ont obtenu 21,9 % des licences, 26,7 % des masters et 23,6 % des doctorats. Toutefois, les femmes ont obtenu plus de 40 % des licences en ingénierie environnementale, biologique, agricole et

biomédicale en 2018. Les femmes ont obtenu plus de 30 % des diplômes en chimie, en architecture, en systèmes industriels et de fabrication, et en ingénierie métallurgique et des matériaux. Le pourcentage de femmes dans les métiers de l'ingénierie est passé de 9 % à 16 % au cours de la période 1993-2016¹⁷.

La proportion des groupes noirs et hispaniques dans les sciences et l'ingénierie est inférieure à 10 %, ce qui est légèrement inférieur à la part de leur population totale. En 2018, les groupes sous-représentés ont enregistré une augmentation du nombre de licences en ingénierie, les étudiants hispaniques obtenant 11,4 % des diplômes, les étudiants noirs 4,2 %, les Amérindiens 0,3 % et les Hawaïens et les insulaires du Pacifique 0,2 % (Roy, 2019).

Europe

Selon la Commission européenne, 59 % des quelque 15 millions de scientifiques et d'ingénieurs de l'UE en 2018 étaient des hommes et 41 % des femmes. Les hommes étaient particulièrement surreprésentés dans l'industrie manufacturière (79 % des scientifiques et ingénieurs de l'industrie manufacturière étaient des hommes). Le secteur des services était plus équilibré, avec 54 % d'hommes et 46 % de femmes¹⁸. Selon l'étude intitulée « Les femmes à l'ère numérique » (Commission européenne, 2018), seules 24 femmes sur 1 000 diplômées de l'enseignement supérieur avaient une matière liée aux TIC, dont 6 seulement travailleraient dans le secteur numérique¹⁹. Afin de promouvoir la diversité pour d'autres groupes sous-représentés, la Commission européenne a présenté sa toute première stratégie européenne pour l'égalité des lesbiennes, gays, bisexuels, trans, non-binaires, intersexuels et queers (LGBTQI) en 2020, dont l'un des objectifs est de renforcer les capacités de prévention de la discrimination dans l'éducation et l'emploi²⁰.

Encadré 2. Atteindre l'égalité pour les LGBTQ dans l'enseignement de l'ingénierie aux États-Unis

L'American Society for Engineering Education (ASEE) a mené une étude sur l'égalité pour les LGBTQ dans l'enseignement de l'ingénierie en 2016. Même si des progrès significatifs en matière d'égalité pour les LGBTQ ont été constatés ces dernières années aux États-Unis grâce à la législation et à l'acceptation sociale, cette étude montre que les étudiants et les professeurs LGBTQ sont toujours victimes d'exclusion et de discrimination sur les campus universitaires. L'étude a révélé que 30 % des étudiants LGBTQ ont sérieusement envisagé de quitter leur établissement en raison d'expériences et de perceptions négatives. Ce pourcentage était le plus élevé (42 %) pour les professeurs et les étudiants de première année (72 %). Ce projet a utilisé un modèle de recherche transformateur, cyclique et à méthodes mixtes pour fournir une base au changement social. Les campus progressent petit à petit vers l'amélioration du climat pour les étudiants LGBTQ grâce à des politiques, des programmes et des pratiques inclusives.

Source : Farrell, et al., 2016.

15 Lesbiennes, gays, transgenres et en questionnement

16 Pour plus de renseignements : <https://engineerscanada.ca/diversity/women-in-engineering/30-by-30>

17 Science and Engineering Indicators : <https://nces.nsf.gov/pubs/nsb20198/demographic-trends-of-the-s-e-workforce>

18 Eurostat au sujet des femmes dans le secteur des sciences et de la technologie : http://bit.ly/37ykalG_women_science

19 Les femmes dans le secteur du numérique : <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/women-digital-0>

20 Plus de renseignements sur la stratégie : <https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/theme-a-new-push-for-european-democracy/file-lgbti-equality-strategy>

Recommandations

1. Harmonisation des statistiques sur l'enseignement et la profession d'ingénieur

L'ingénierie est un secteur très diversifié, au niveau tant de l'enseignement que des activités professionnelles. Une approche commune est nécessaire afin d'harmoniser les définitions et l'enregistrement des données, qui doivent également refléter les tendances de la diversité dans le secteur de l'ingénierie.

- Les institutions gouvernementales et les organisations d'ingénieurs devraient renforcer leur coopération afin d'harmoniser davantage les normes de collecte et d'étude des données de la profession.

2. Enseignement, apprentissage tout au long de la vie et perfectionnement

En vue d'aider les ingénieurs à mener la transition vers des voies de développement plus durables, le développement des compétences non techniques sera aussi important que le développement des compétences techniques tout au long de la vie. Les universités sont au cœur de cette mission, de même que les organisations d'ingénieurs qui soutiennent ces derniers dans leurs accréditations professionnelles et dans l'apprentissage tout au long de la vie.

- Avec le soutien des organisations d'ingénieurs, il est demandé aux universités de leur offrir des opportunités croissantes de développement continu. Ces efforts devraient inclure l'harmonisation des accréditations professionnelles en Europe et en Amérique du Nord.

3. Contribution des ingénieurs à l'amélioration des politiques

Le passage à l'économie numérique, verte et circulaire exige la participation d'ingénieurs aux processus d'élaboration des politiques. Traditionnellement, les ingénieurs étaient principalement impliqués dans l'aspect technique de la formulation des politiques. Cependant, on attend de plus en plus des ingénieurs qu'ils travaillent non seulement sur la partie technique de la solution, mais aussi qu'ils examinent les effets des solutions technologiques sur la société dans son ensemble. On attend des ingénieurs professionnels qu'ils aient d'excellentes compétences relationnelles et qu'ils soient capables de travailler sur des projets multidisciplinaires. Ces nouvelles compétences permettront également aux ingénieurs d'avoir un impact sur les politiques à tous les niveaux de gouvernement.

- Les ingénieurs et les communautés d'ingénieurs devraient être proactifs en s'engageant dans les fédérations nationales et internationales d'ingénierie et d'industrie, qui s'engagent auprès des décideurs politiques au nom de leurs membres.
- Les ingénieurs individuels devraient jouer un rôle plus important dans les consultations publiques et les enquêtes ouvertes, qui constituent toutes une partie importante de l'élaboration des politiques.

4. Partenariats et collaboration

Les partenariats, les collaborations et les réseaux permettent de progresser sur la voie du développement durable. Le partage des connaissances dans le domaine de l'éducation est le tremplin pour atteindre des sociétés civiles égales dans le monde entier. Dans le cadre de l'Objectif de développement durable 17 sur les partenariats pour la réalisation des objectifs, les Nations Unies fournissent une plateforme de collaboration à portée mondiale²¹.

- Les pays européens et nord-américains devraient accélérer leurs efforts de coopération pour partager les connaissances et contribuer à renforcer les capacités d'ingénierie au niveau mondial.

21 Pour plus de renseignements sur la Plateforme des partenariats, cliquer sur le lien suivant : <https://sustainabledevelopment.un.org/partnership/browse>

Références

- BEI. 2020. *Who is prepared for the new digital age? Evidence from the EIB Investment Survey*. Banque européenne d'investissement. https://www.eib.org/attachments/efs/eibis_2019_report_on_digitalisation_en.pdf
- Bureau américain des statistiques du travail. 2018. Engineers: Employment, pay, and outlook. *Career Outlook*, février 2018. https://www.bls.gov/careeroutlook/2018/article/engineers.htm?view_full
- Bureau américain des statistiques du travail. 2020. Architecture and Engineering Occupations. <https://www.bls.gov/oo/architecture-and-engineering/home.htm#:~:text=Employment%20in%20architecture%20and%20engineering,are%20projected%20to%20be%20added>
- CEE. 2020. *Towards Achieving the Sustainable Development Goals in the UNECE Region – A Statistical Portrait of Progress and Challenges*. Genève, Commission économique des Nations Unies pour l'Europe. https://www.unece.org/fileadmin/DAM/stats/publications/2020/SDG_report_for_web.pdf
- Commission européenne. 2018. Les femmes à l'ère numérique. *lclaves*. <https://op.europa.eu/fr/publication-detail/-/publication/84bd6dea-2351-11e8-ac73-01aa75ed71a1>
- Commission européenne. 2020a. Économie circulaire – nouveau plan d'action visant à accroître le recyclage et la réutilisation des produits dans l'UE. <https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12095-A-new-Circular-Economy-Action-Plan>
- Commission européenne. 2020b. La Commission présente la stratégie européenne en matière de compétences en faveur de la compétitivité durable, de l'équité sociale et de la résilience. *Communiqué de presse*, 1^{er} juillet. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fr/ip_20_1196
- Commission européenne. 2020c. Plan de relance pour l'Europe. https://ec.europa.eu/info/strategy/recovery-plan-europe_fr
- EFCA. 2018 *Future trends in the consulting engineering industry*. European Federation of Engineering Consultancy Associations. https://www.efca.be/sites/default/files/2019-03/EFCA%20trends%20booklet_final%20version_05%2006%202018.pdf
- Farrell, *et al.* 2016. ASEE Safe Zone Workshops and Virtual Community of Practice to Promote LGBTQ Equality in Engineering. *American Society for Engineering Education*, Paper ID : 14806. <https://www.asee.org/public/conferences/64/papers/14806/download>
- Ingénieurs Canada, 2020a. Rapport de 2020 sur les effectifs de la profession à l'échelle nationale. Données pour 2019. <https://engineerscanada.ca/fr/rapports/rapport-national-denquete-sur-les-effectifs/rapport-2020>
- Ingénieurs Canada. 2020b. Inscriptions en génie et diplômes décernés - Tendances de 2014 à 2018. <https://engineerscanada.ca/fr/publications/des-ingenieurs-canadiens-pour-lavenir-2018>
- McKinsey & Company. 2014. *Education to Employment: Getting Europe's Youth into Work*. <https://www.mckinsey.com/industries/public-and-social-sector/our-insights/converting-education-to-employment-in-europe>
- McKinsey Global Institute. 2020. The future of work in Europe: Automation, workforce transitions, and the shifting geography of employment. Document de consultation. http://bit.ly/McKinsey_future_of_work
- National Science Foundation. 2019. *Science and Engineering Labor Force*. <https://nces.nsf.gov/pubs/nsb20198/demographic-trends-of-the-s-e-workforce>
- OIT. 2019. *Skills for a greener future: A global view based on 32 country studies*. Organisation internationale du travail. https://www.ilo.org/skills/pubs/WCMS_732214/lang--fr/index.htm
- Parlement européen. 2018. The impact of new technologies on the labour market and the social economy. Science and Technology Options Assessment. Service de recherche du Parlement européen. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/614539/EPRS_STU\(2018\)614539_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/614539/EPRS_STU(2018)614539_EN.pdf)
- Roy, J. 2019. *Engineering by the Numbers*. <https://www.asee.org/documents/papers-and-publications/publications/college-profiles/2018-Engineering-by-Numbers-Engineering-Statistics-UPDATED-15-July-2019.pdf>
- Statistique Canada. 2018. Bilan annuel du marché du travail, 2018. Statistiques sur le travail : Documents de recherche. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/75-004-m/75-004-m2019002-fra.htm>
- Table ronde des industriels européens. 2019. *Turning Global Challenges into Opportunities – A Chance for Europe to Lead*. <https://ert.eu/wp-content/uploads/2019/12/2019-12-09-Turning-Global-Challenges-into-Opportunities-A-Chance-for-Europe-to-Lead-Full-Version-Publication.pdf>

Yuan Si²²

5.3 ASIE ET PACIFIQUE



© Chinese Society for Electrical Engineering (CSEE)

Engineers in electrical engineering

22 Professeur, Université Tsinghua et Centre international pour l'enseignement de l'ingénierie (ICEE).

L'ingénierie au service du développement durable

Résumé. L'ingénierie joue un rôle essentiel dans le développement économique et le niveau de vie des pays et des régions du monde entier. En Asie et dans le Pacifique, elle doit résoudre deux défis inévitables : l'accélération du vieillissement de la population et la dégradation de l'environnement. Or, les solutions d'ingénierie durable reposent en partie sur la quantité et la qualité de la main-d'œuvre, la capacité d'innovation et l'enseignement de l'ingénierie. Dans la région, la croissance de l'emploi dans le secteur de l'ingénierie a connu une augmentation régulière depuis 2001, malgré un ralentissement enregistré dans certains marchés clés. En revanche, les femmes sont toujours sous-représentées dans les secteurs de l'industrie, ce qui limite la diversité parmi les ingénieurs. En outre, les activités de recherche et de développement et l'entrepreneuriat ne se développent pas au même rythme d'un pays à l'autre. Enfin, on observe dans la région une accélération des réformes de l'enseignement de l'ingénierie axées sur les problèmes du monde réel, rendue possible grâce aux progrès permettant aux ingénieurs de faire preuve de plus d'innovation et d'esprit d'entreprise. Les sections ci-après passent en revue les principales tendances en matière d'ingénierie en Asie et dans le Pacifique.

Enjeux régionaux dans la région Asie-Pacifique

La région Asie-Pacifique s'étend de l'océan Pacifique occidental à l'océan Indien et représente notamment une grande diversité de systèmes économiques, de sociétés, de géographies et de conditions météorologiques, dans toute la région. Cependant, si l'on considère l'Asie - Pacifique, plusieurs tendances qui ont un impact sur la région nécessitent l'ingénierie pour comprendre les impacts et apporter des solutions. Voici les principales tendances observées dans la région.

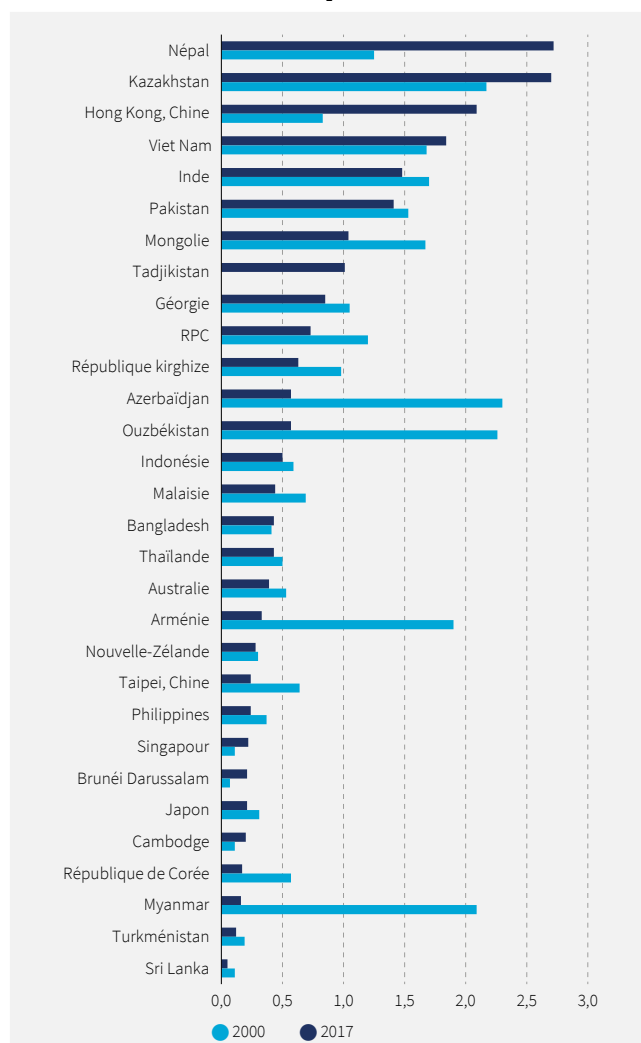
Viellissement de la population et de la société

Le vieillissement de la population dans les pays de la région Asie-Pacifique augmente à un rythme sans précédent, entraînant des défis qui lui sont propres. Selon les estimations, en 2050, la région devrait compter autant de personnes âgées de plus de 65 ans que de jeunes de moins de 15 ans, et la part de personnes âgées par rapport au total de la population devrait passer de 8,1 % à 18,1 % (BASD, 2018). L'ingénierie peut contribuer à affronter la tendance au vieillissement de la population grâce à la santé, au transport médical et à l'environnement bâti.

Dégradation de l'environnement

Le second défi repose sur le fait que la région souffre toujours de la dégradation de l'environnement. En effet, bien que la superficie des terres forestières ait augmenté dans certains pays (comme c'est le cas en Chine et aux Philippines, par exemple), en 2014, la région composée de l'Asie et du Pacifique était responsable de près de la moitié (47,7 %) des émissions mondiales totales de dioxyde de carbone (CO₂) (BASD, 2018). Cependant, les émissions de CO₂ par unité de valeur ajoutée manufacturière ont diminué dans plus des deux tiers des économies déclarantes de l'Asie et du Pacifique (figure 1). Cela suggère que les politiques visant à améliorer et à transformer l'industrie manufacturière pour adopter des approches plus durables dans certains pays, comme la Chine, jouent un rôle actif dans la protection de l'environnement.

Figure 1. Émissions de dioxyde de carbone par unité de valeur ajoutée manufacturière (kg de CO₂ par \$ constants de 2010)



\$ = dollars des États-Unis, CO₂ = dioxyde de carbone, kg = kilogramme, RPC = République populaire de Chine

Note : Seules les économies pour lesquelles des données de données sont disponibles pour les années 2000 et 2017 sont incluses. Pour Taipei, en Chine, l'unité de mesure est le kg d'équivalent CO₂ par \$ constant de 2015. Pour l'année 2000, le Tadjikistan ne dispose d'aucune donnée enregistrée pour les émissions de CO₂ par unité de valeur ajoutée manufacturière.

Source : BASD, Indicateurs clés pour l'Asie et le Pacifique 2020

Changement climatique et risques naturels

Selon le Bureau des Nations Unies pour la prévention des catastrophes, 8 des 10 premiers pays du monde par le nombre de catastrophes géophysiques, hydrologiques, météorologiques et climatologiques survenues entre 2000 et 2019 se trouvaient dans la région Asie-Pacifique (figure 2). Les tremblements de terre, les tempêtes, les tsunamis, les phénomènes météorologiques extrêmes, les inondations, les sécheresses et autres catastrophes sont extrêmement préjudiciables à la vie et à l'économie locales. L'ingénierie joue un rôle très important dans la résilience au changement climatique, l'adaptation et la réduction des risques de catastrophes en évaluant le risque sous-jacent et en fournissant des mesures concrètes et non concrètes.

Croissance de l'emploi dans l'industrie et modification de la structure du travail

Dans la plupart des régions du monde, l'emploi dans les secteurs de l'agriculture, de l'industrie et des services a connu des changements mineurs entre 2002 et 2018. En Asie et dans le Pacifique, cependant, on note que l'emploi dans le domaine de l'industrie est en hausse depuis 2002 par rapport aux autres régions (figure 3).

Figure 2. Dix premiers pays par risques de sous-groupes de catastrophes (2000-2019)

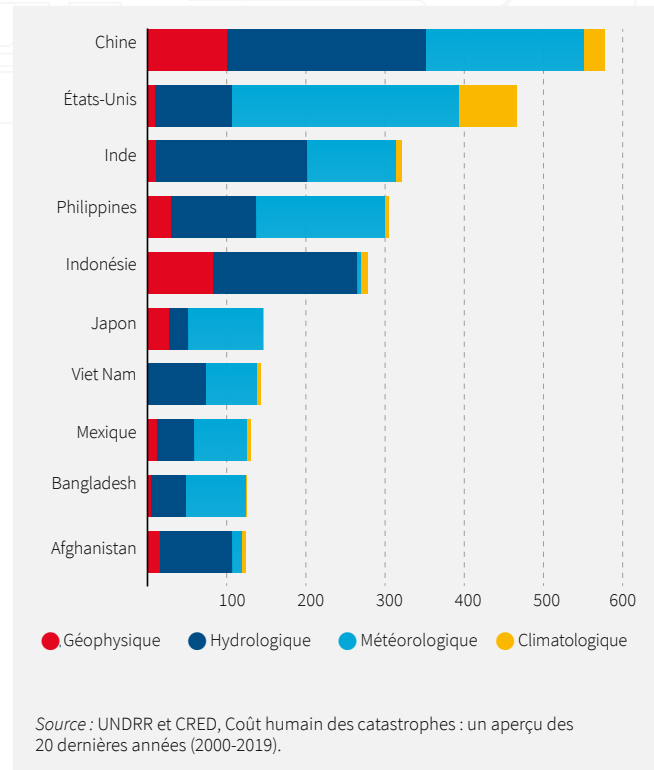
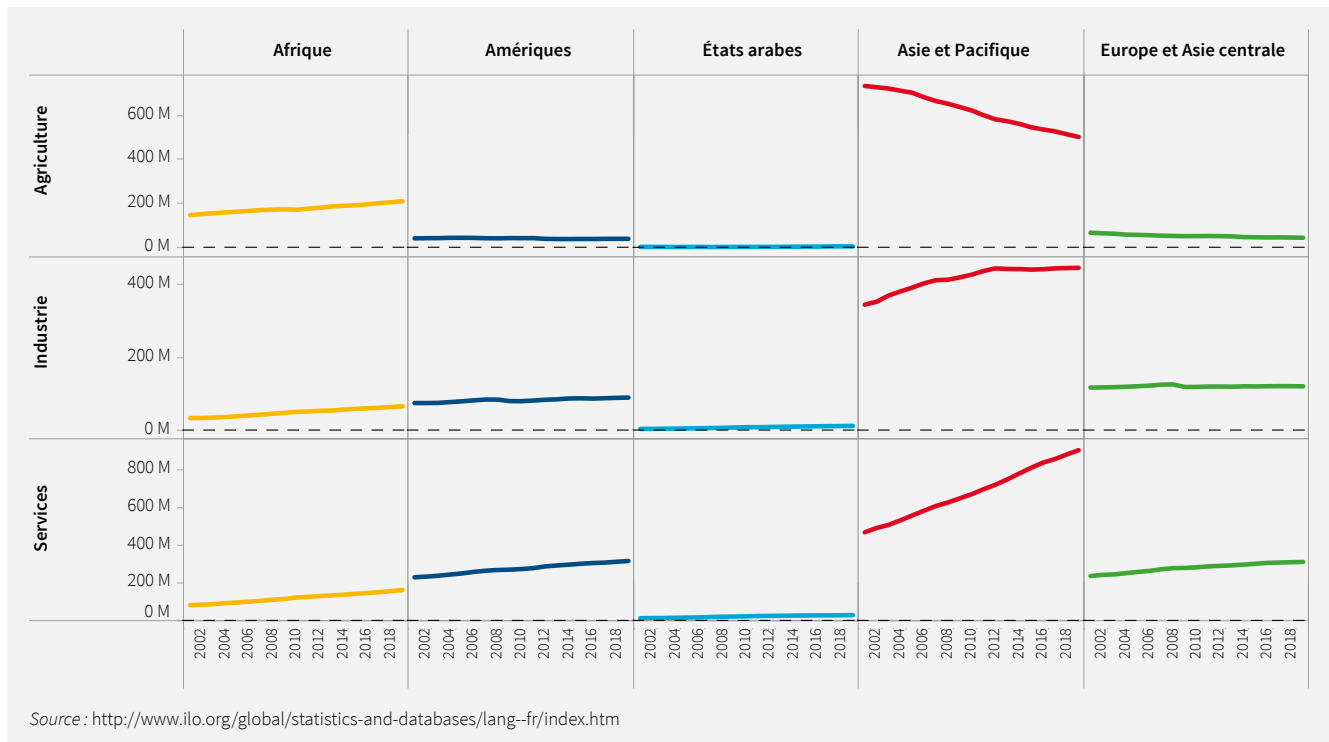


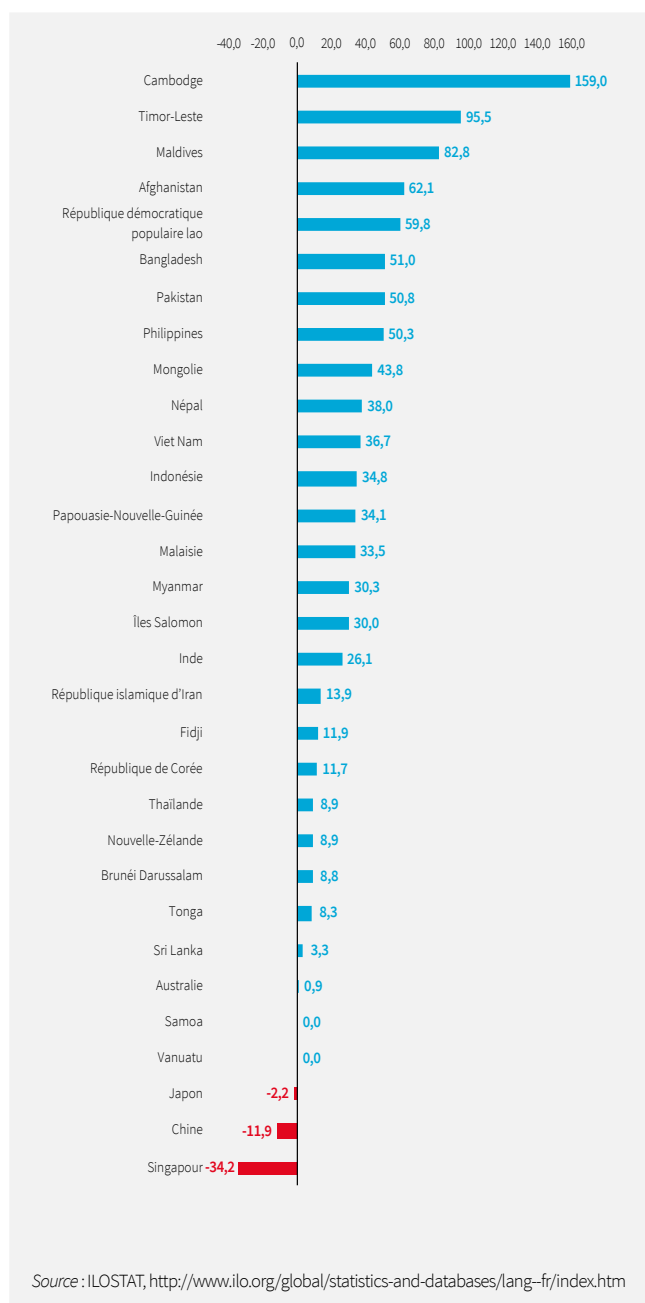
Figure 3. Emploi - Estimations modélisées de l'OIT dans le monde (par région)



L'ingénierie au service du développement durable

Dans la région de l'Asie et du Pacifique, la croissance de l'emploi dans le secteur de l'industrie varie considérablement d'un pays à l'autre (figure 4) en fonction de divers facteurs démographiques et économiques. Par exemple, entre 2009 et 2018, l'emploi dans le secteur de l'industrie a augmenté de 159 % au Cambodge, notamment grâce à la création d'usines textiles et de chaussures tournées vers l'exportation. En revanche, le taux d'emploi dans le secteur de l'industrie à Singapour a enregistré le ralentissement le plus marqué (34,2 %), en raison d'une hausse de l'emploi continue dans le secteur des services. Au cours de la même période, l'emploi dans le secteur de l'industrie a reculé de 2,2 % au Japon, en partie sous l'effet de la faible croissance de la main-d'œuvre.

Figure 4. Tendances de la croissance de l'emploi dans le secteur de l'industrie en Asie et dans le Pacifique, 2019



La forte diminution de la main-d'œuvre dans l'industrie agricole a toutefois été soutenue par les machines/automatisations. La main-d'œuvre augmente rapidement dans les industries et peut également être soutenue par les machines/automatisations. Elle a également fortement augmenté dans le secteur des services. Il convient de noter que l'industrie des services comprend non seulement l'information et la technologie, mais aussi les filières essentielles (eau, gaz, électricité) et le secteur de la construction. L'ingénierie peut donc jouer un rôle important dans cette industrie en pleine croissance.

Environnement pour l'ingénierie dans la région Asie-Pacifique

Investissement dans la recherche et le développement en ingénierie

La recherche et le développement constituent un important moteur de l'innovation et peuvent anticiper les tendances technologiques futures. Le succès de la recherche et du développement dépend en partie des dépenses engagées dans ce domaine ainsi que du nombre de chercheurs qui y sont affectés. En Asie et dans le Pacifique, les dépenses liées à la recherche et au développement ont connu une croissance rapide, tout comme le nombre de chercheurs. La Chine affiche la croissance la plus forte en matière de recherche et développement : au cours de la période 2010-2015, le pays a concentré près d'un tiers de l'augmentation mondiale des dépenses consacrées au secteur (National Science Foundation, 2018). En République de Corée, le nombre de travailleurs affectés à la recherche et au développement par million d'habitants a largement augmenté, passant de 2 914 en 2000 à 8 809 en 2016 (BASD 2018).

L'entrepreneuriat consiste à favoriser l'innovation sur le marché. Souvent, il est facilité par la présence de communautés de start-up qui bénéficient de mécanismes d'incubation et d'investissement. De nombreuses entreprises influentes ont été fondées par des ingénieurs, contribuant ainsi de manière significative au développement de l'ingénierie. Au cours des dix dernières années, la simplification et la déréglementation des contraintes administratives ont permis de stimuler la création d'entreprises. L'une des améliorations les plus importantes concernant le délai de création d'une entreprise s'est produite en Asie du Sud-Est, où le nombre moyen de jours requis est passé de 75 jours en 2005 à 30 jours en 2017 (BASD, 2018).

Participation des femmes à l'industrie

En Asie et dans le Pacifique, la participation des femmes au secteur de l'industrie varie considérablement d'un pays à l'autre (figure 5). En Afghanistan, en Australie, en Inde, en Iran, au Pakistan, en Papouasie-Nouvelle-Guinée, au Timor-Leste et au Vanuatu, les femmes représentent moins de 20 % des employés du secteur de l'industrie. Au Cambodge, en revanche, la répartition de l'emploi entre les femmes et les hommes atteint presque la parité. Bien que les Tonga aient le pourcentage le plus élevé de femmes employées dans le secteur de l'industrie,

leur nombre dans ce secteur ne dépasse pas 9 000 femmes. Dans l'ensemble, les femmes sont encore sous-représentées dans le secteur de l'industrie en Asie et dans le Pacifique. Cependant, les difficultés auxquelles elles sont confrontées dans la poursuite d'une carrière et l'évolution de carrière en ingénierie peuvent dépendre du contexte national et des conditions spécifiques de chaque pays (BA&D, 2015).

Figure 5. Taux d'emploi dans le secteur de l'industrie par genre, Asie et Pacifique, 2018



Système d'enseignement des sciences de l'ingénieur

Les défis mondiaux liés au vieillissement de la population et à la dégradation de l'environnement s'aggravant, il est urgent de former les futurs ingénieurs de façon à faire progresser l'innovation technologique et à résoudre des problèmes complexes. La région Asie-Pacifique effectue d'importants progrès en matière de réforme de l'enseignement de l'ingénierie afin de permettre aux étudiants de faire preuve à la fois d'innovation et d'initiative et de renforcer leurs capacités à résoudre des problèmes concrets.

De nombreux programmes spécifiques de formation professionnelle ont été mis en place pour renforcer les compétences en ingénierie en vue de bâtir une société durable. Par exemple, le Ministère japonais de l'environnement a collaboré avec les organismes gouvernementaux compétents pour mettre en œuvre des initiatives de leadership environnemental en faveur de la durabilité en Asie, qui comprennent l'élaboration de programmes modèles afin de renforcer les capacités d'encadrement.

Reconnaissance mutuelle des diplômes d'ingénierie

La Coopération économique Asie-Pacifique (APEC) est un forum économique régional créé en 1989. Certains pays membres de l'APEC ont signé un accord visant à reconnaître une « équivalence substantielle » des compétences professionnelles en ingénierie sous l'égide de l'International Engineering Alliance (IEA). En tant qu'organisation indépendante regroupant les institutions d'ingénierie de la région de l'Asie du Sud-Est et du Pacifique, la Fédération des institutions d'ingénieurs en Asie et dans le Pacifique (FEIAP) promeut actuellement la reconnaissance mutuelle régionale des diplômes d'ingénierie au sein de ses 20 membres. Ces organisations régionales et les accords sur la mobilité des ingénieurs ont considérablement facilité l'intégration des systèmes de formation des ingénieurs et du système des professions d'ingénieur dans la région, ce qui est bénéfique à la mise en place d'une communauté régionale d'ingénieurs plus inclusive et plus innovante.

Progrès des sciences de l'ingénieur et solutions aux défis régionaux

Mesures douces, système éducatif

Outre l'enseignement traditionnel, l'apprentissage ouvert et l'enseignement en ligne sont de plus en plus utilisés au moyen de salles de classe interactives. Ainsi, Rain Classroom, un système mobile de gestion de l'apprentissage développé par l'Université Tsinghua et XuetangX²³ en Chine, est couramment utilisé pour appuyer l'innovation dans la salle de classe et les activités en

23 Pour plus de renseignements sur la plateforme d'apprentissage XuetangX, consulter le lien suivant : www.xuetangx.com

L'ingénierie au service du développement durable

laboratoire. Le concept de « classe inversée » est également largement utilisé dans l'enseignement de l'ingénierie à l'Université de Chulalongkorn en Thaïlande. La collaboration multipartite au niveau national peut aussi constituer une approche efficace pour améliorer la compétence des futurs ingénieurs qui ont un rôle essentiel à jouer dans la réalisation du développement durable. En Chine, par exemple, le Centre international pour l'enseignement de l'ingénierie, placé sous l'égide de l'UNESCO, a servi de plateforme interdisciplinaire permettant aux enseignants en ingénierie du monde entier de travailler ensemble afin de relever des défis concrets et complexes en ayant recours à des solutions d'ingénierie. En 2007, le Centre a organisé un programme de formation à l'Université Tsinghua qui a permis à des étudiants du Bangladesh, du Kenya, du Pakistan, de Zambie et d'autres pays en développement d'apprendre, de collaborer et de communiquer entre eux.

Mesures concrètes et progrès en ingénierie

Dans la région Asie-Pacifique, la technologie de l'ingénierie joue non seulement un rôle essentiel dans la prévention et la réduction des risques et des catastrophes naturelles, mais elle soutient également le développement rapide des infrastructures et la croissance de l'économie. Les moyens de transport tels que les autoroutes, les chemins de fer, les aéroports et les ports maritimes facilitent non seulement le commerce dans la région, réduisent les coûts logistiques et relient les personnes dans différents pays, mais ils contribuent également à la circulation des personnes et au développement du tourisme. Les technologies émergentes, telles que l'intelligence artificielle, la réalité virtuelle et l'analyse des mégadonnées dans les domaines de l'éducation et de la santé, contribuent également à accroître l'adoption des technologies et à diagnostiquer et traiter les maladies à temps. Le vieillissement de la population a un impact négatif sur le développement économique, notamment en ce qui concerne la réduction de la productivité au travail, mais les nouvelles technologies peuvent contribuer à maintenir la croissance de la productivité et l'augmentation des compétences des populations vieillissantes (BA&D, 2019).

Conclusions

L'innovation technologique en ingénierie dans la région Asie-Pacifique est très dynamique, mais de nombreux défis économiques, sociaux et environnementaux existent en parallèle. Afin de promouvoir l'ingénierie pour mieux soutenir les Objectifs de développement durable, les gouvernements, l'industrie, les établissements scolaires et les autres parties prenantes doivent forger des partenariats plus étroits et plus inclusifs, et prendre des mesures plus stratégiques et pragmatiques de manière à traiter ces questions clés.

Recommandations

1. Incitation de davantage de jeunes à étudier l'ingénierie et à choisir la profession d'ingénieur en les attirant au moyen de projets d'ingénierie innovants et d'initiatives STEM²⁴.
2. Amélioration de la participation des femmes dans le domaine de l'ingénierie en mettant en place des politiques visant à offrir aux femmes et aux hommes des lieux de travail plus flexibles qui favorisent le bien-être des familles et permettent le partage des responsabilités liées à l'éducation des enfants.
3. Accroissement de la capacité d'innovation de chaque pays en augmentant les investissements en matière de personnel affecté à la recherche et au développement et les dépenses y les concernant.
4. Encouragement de l'entrepreneuriat en simplifiant le processus de création d'entreprise, et mise en place d'un écosystème efficace pour la commercialisation des idées innovantes, en proposant des cours et des services consultatifs en administration des entreprises et en créant des réseaux afin de partager les expériences.
5. Réduction au minimum du fossé entre le système éducatif et la profession d'ingénieur en favorisant la reconnaissance mutuelle dans toute la région afin d'accroître la mobilité des ingénieurs.
6. Promotion des partenariats pour relever les défis du développement durable en facilitant une collaboration efficace en matière d'ingénierie et d'éducation entre les pays de la région.
7. Garantie de la prise en compte de nouvelles politiques et actions pratiques et promotion de la transformation de l'industrie pour le développement durable.

²⁴ Sciences, technologie, ingénierie et mathématiques.

Références

- BAsD. 2015. *Women in the workforce: An unmet potential in Asia and the Pacific*. Mandaluyong, Philippines, Banque asiatique de développement. www.adb.org/publications/women-workforce-unmet-potential-asia-and-pacific
- BAsD. 2018. *Key indicators for Asia and the Pacific 2018*. 49^{ème} édition. Mandaluyong, Philippines, Banque asiatique de développement. www.adb.org/publications/key-indicators-asia-and-pacific-2018
- BAsD. 2019. *The Asian Economic Integration Report 2019/2020*. Demographic change, productivity, and the role of technology. Mandaluyong, Philippines, Banque asiatique de développement. <https://www.adb.org/sites/default/files/publication/536691/aeir-2019-2020.pdf>
- BAsD. 2020. *Key Indicators for Asia and the Pacific*. 51^e édition. Mandaluyong, Philippines, Banque asiatique de développement. <https://www.adb.org/sites/default/files/publication/632971/ki2020.pdf>
- National Science Foundation. 2018. *Science and engineering indicators 2018*. www.nsf.gov/statistics/2018/nsb20181
- UNDRR et CRED. 2020. *Human cost of disasters: an overview of the last 20 years (2000–2019)*. Bureau des Nations Unies pour la prévention des catastrophes et Centre de recherche sur l'épidémiologie des catastrophes. <https://www.undrr.org/media/48008/download>

**Jorge Emilio Abramian²⁵,
José Francisco Sáez²⁶
et Carlos Mineiro Aires²⁷**

5.4 AMÉRIQUE LATINE ET CARAÏBES



© CFIA

Professional engineers from the Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica

25 Président élu du Conseil mondial des ingénieurs civils (WCCE)

26 Directeur général du Conseil mondial des ingénieurs civils

27 Président du Conseil mondial des ingénieurs civils

Résumé. Au cours des dernières décennies, la région de l'Amérique latine et des Caraïbes (ou ALC) a connu deux facteurs principaux qui entravent la réalisation des Objectifs de développement durable des Nations Unies : une croissance économique lente et l'absence d'un système de protection sociale solide, qui se traduit par un pourcentage élevé d'emplois informels. Ces facteurs expliquent pourquoi les efforts déployés par les pays d'ALC pour satisfaire les besoins fondamentaux, tels qu'un logement adéquat, l'accès à l'eau potable, l'assainissement et le traitement des déchets respectueux de l'environnement, ne répondent pas aux normes de résultats des ODD. Cette section présente brièvement les problèmes qui touchent l'ALC et explique comment les ingénieurs peuvent aider à surmonter les lacunes existantes.

Enjeux régionaux en Amérique latine et dans les Caraïbes dans le contexte des défis liés à l'ingénierie

Tandis que l'Amérique latine et les Caraïbes s'apprentent à relever le défi que représente le Programme de développement durable à l'horizon 2030, la région enregistre le taux de croissance à long terme le plus faible de toutes les régions en développement²⁸. Cette croissance atone touche également les niveaux d'investissement, tant dans l'innovation technologique que dans les infrastructures. Depuis 1980, l'investissement public en pourcentage du PIB est ainsi passé de 5,9 % à 4,8 %. De ce fait, l'infrastructure et la compétitivité ont également décliné. Selon l'Étude sur la situation économique de l'Amérique latine et des Caraïbes de 2018, élaborée par la Commission économique pour l'Amérique latine et les Caraïbes (CEPALC)²⁹, une ventilation de la formation brute de capital fixe par actif de construction (y compris la construction résidentielle et non résidentielle) et par actif de machines et de matériel indique que, si la première composante représente une part plus importante des investissements et un pourcentage plus élevé du PIB, la seconde composante croît plus vite, témoignant d'une reprise modérée.

L'Étude mentionne également que l'emploi rémunéré s'est considérablement développé avec la croissance économique en Amérique latine et dans les Caraïbes, et que le travail indépendant³⁰ – qui constitue la deuxième catégorie dans la région en termes d'emplois – tend à montrer une évolution essentiellement anticyclique. Cela s'explique principalement par l'intérêt des ménages à générer des revenus par leur propre emploi en raison de l'absence de nouveaux emplois salariés et du manque de mécanismes de protection sociale adéquats pendant les phases de faible croissance.

La faiblesse des taux de croissance et des niveaux d'investissement, associée à des problèmes de développement et des questions sociales comme l'absence de protection sociale efficace et l'emploi informel, indique que les ingénieurs ont un rôle clé à jouer pour surmonter les faiblesses attribuées à la faible croissance, en conformité avec les ODD. Tous ces objectifs sont liés, certains nécessitant une contribution directe de la communauté des ingénieurs. Les principales questions qui lient les pays d'Amérique latine et des Caraïbes aux ODD et à l'ingénierie sont présentées ci-dessous.

Questions sociales et développement

Comme mentionné précédemment, il existe un certain nombre de problèmes de croissance sociale et économique en ALC qui entravent la réalisation des ODD et dont l'amélioration demande le recours à différentes disciplines d'ingénierie. Selon le rapport de la Banque interaméricaine de développement (BIAD) préparé par Iorio et Sanin (2019), la région ALC a une couverture électrique³¹ de 97 % qui se classe parmi l'une des matrices énergétiques les plus propres au monde, mais les problèmes dans d'autres domaines persistent dans des questions fondamentales qui affectent la santé et le bien-être publics, comme le logement adéquat, l'eau potable et l'assainissement.

Selon le rapport 2015 d'UN Habitat, il n'existe pas de définition commune du « déficit en matière de logement » dans la région. La définition d'un logement convenable doit inclure l'accès à l'eau potable, à l'assainissement et à l'énergie, ce « déficit en matière de logement » affectant entre 30 et 180 habitants sur mille. Les niveaux de couverture des services d'eau sont bien plus inquiétants, puisque seuls trois pays d'Amérique latine et des Caraïbes fournissent plus de 80 % de leur population en eau potable « gérée de manière sûre » (OMS/UNICEF, 2019). En ce qui concerne les niveaux de couverture en matière d'assainissement, seuls sept pays fournissent un assainissement « sûr » à plus de 40 % de leur population et, parmi eux, un seul pays en fournit plus de 60 %.

28 Amérique latine et Caraïbes (2,6 %), contrairement à l'Afrique subsaharienne (3,26 %), au Moyen-Orient et à l'Afrique du Nord (3,92 %) et à l'Asie de l'Est et au Pacifique (8,1 %). Le taux de croissance à long terme en Europe et en Asie centrale (à l'exception des pays à revenu élevé) s'est situé à 1,75 % en moyenne au cours des trente dernières années. Voir la Base de données de la Banque mondiale <https://databank.worldbank.org/data/home.aspx>

29 Site Web officiel de la CEPALC : <https://www.cepal.org/en>

30 Les travailleurs indépendants travaillent à leur compte et sont considérés comme autonomes.

31 Banque mondiale. Accès à l'électricité (% de la population). <https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/EG.ELC.ACCS.ZS?locations=ZJ>

Dégradation de l'environnement

Parallèlement aux ODD relatifs au bien-être humain, la préservation de l'environnement est au cœur du développement durable dans la région. Les pays d'ALC contiennent de vastes zones sensibles au niveau environnemental telles que des barrières de récifs coralliens, de grands marais d'eau douce et des forêts tropicales. Les zones rurales de la région abritent 125 millions de personnes, dont 60 % des personnes les plus pauvres de la région. La désertification et la dégradation des ressources naturelles affectent sérieusement presque tous les pays de la région ALC, ce qui est exacerbé par l'expansion des activités agricoles et met en danger l'environnement et ses ressources naturelles. Le Bureau des Nations Unies pour la coordination des affaires humanitaires a publié un article (Milesi et Jarroud, 2016) soulignant que 68 % des terres d'Amérique du Sud sont touchées par la désertification, où 100 millions d'hectares ont été déboisés et 70 millions ont fait l'objet de surpâturage. La pollution de l'eau, de l'air et du sol est également signalée, principalement associée à l'exploitation minière irresponsable, à l'utilisation d'engrais et de pesticides, à la circulation en ville et au déversement non traité de déchets et d'effluents d'eaux usées.

Le développement durable et la protection de l'environnement exigent une planification, une conception, une exécution, une exploitation et un démantèlement responsables des systèmes de gestion et des infrastructures, alors que les ingénieurs doivent faire preuve de leur engagement et de leur expertise pour protéger l'environnement. D'où l'importance d'un enseignement et d'une formation solides et généralisés en ingénierie.

Changement climatique et risques naturels

Le changement climatique dans les pays d'Amérique latine et des Caraïbes affectera fortement les côtes et les zones urbaines (Nurse *et al.*, 2014 ; OCHA, 2020 ; Huber, 2018). La hausse des températures des océans touche fortement les pays des Caraïbes avec l'apparition d'ouragans³², la croissance rapide d'algues et la mort des coraux. Les effets de cette hausse sur la terre ferme sont liés à des épisodes extrêmes d'inondations et de sécheresses, qui alternent soit par région, soit même au sein d'une même région. La hausse des températures provoque des incendies plus fréquents et plus importants qui ont de graves répercussions sur les communautés touchées. Enfin, la quasi-totalité de la région est soumise à des risques sismiques ou volcaniques³³, voire aux deux.

Là encore, ces faits exigent l'intervention d'ingénieurs pour évaluer correctement les risques et prévoir ces événements en utilisant des technologies intelligentes destinées à donner des alertes précoces, adapter les codes structurels des procédures de construction et de construction, et concevoir des solutions d'atténuation.

Environnement pour l'ingénierie dans la région Amérique latine et Caraïbes

Comme mentionné ci-dessus, le développement régional et les questions environnementales exigent des réponses rapides et efficaces de l'ingénierie. Dans le même temps, l'ingénierie constitue l'un des outils les plus efficaces pour répondre à la réalisation des ODD, avec :

- La garantie de la santé et du bien-être (Objectif 3) ainsi que de l'eau propre et de l'assainissement (Objectif 6), par la conception et la construction de systèmes d'égouts et de stations d'épuration des eaux et des eaux usées.
- L'énergie propre et d'un coût abordable (Objectif 7) et l'industrie, l'innovation et l'infrastructure (Objectif 9), qui concernent de près toutes les disciplines en lien avec l'ingénierie.
- Les villes et communautés durables (Objectif 11) et la lutte contre les changements climatiques (Objectif 13), qui ont, par exemple, un lien avec l'ingénierie des transports ainsi que la construction et la gestion des usines, entre autres spécialités.
- La consommation et la production responsables (Objectif 12), qui sont clairement liées à la mise en œuvre de systèmes de recyclage et de programmes de traitement des déchets.

Qui plus est, les 17 Objectifs de développement impliquent tous, d'une manière ou d'une autre, le recours aux évolutions technologiques et à l'application des sciences en vue de faire le meilleur usage possible des ressources disponibles. Par exemple, l'Objectif 1 (Pas de pauvreté) est directement lié à l'Objectif 2 (Faim « zéro »), et les deux relèvent de la production alimentaire (ingénierie agronomique), du transport des biens (ingénierie civile, mécanique et électrique) et de l'entreposage à froid et à sec (ingénierie mécanique et civile).

Considérant l'importance de l'ingénierie dans la réalisation de ces objectifs, il est indispensable de revoir le nombre d'ingénieurs en Amérique latine et leurs besoins. Il n'existe pas actuellement de statistiques mondiales fiables relatives au nombre d'ingénieurs dans les différents pays. Les chiffres actuels sont incomplets, car certains pays ne tiennent pas de registre professionnel officiel et ils ne sont pas fiables en raison des pratiques informelles en matière d'ingénierie, y compris dans les pays où la licence est obligatoire.

Le Conseil mondial des ingénieurs civils (WCCE) estime que les pays développés comptent entre 1 300 et 2 500 ingénieurs civils par million d'habitants (Abramian, 2020). En comparaison, en Amérique latine, sur la base d'un échantillon de 10 pays, ces chiffres vont de 200 à 1 666 ingénieurs pour un million d'habitants. À l'exception

³² L'année 2017 a été la pire saison des ouragans en ce qui concerne le nombre de pays touchés et les dégâts.

³³ En Amérique du Sud, 25 % des grands séismes ont une magnitude supérieure à 8 sur l'échelle de Richter.

de la Bolivie et du Brésil, les pays de l'échantillon affichent un nombre d'ingénieurs civils inférieur à la moyenne mondiale et bien plus faible que dans les pays développés (environ 1 000 par million d'habitants). Ces ratios soulignent une pénurie d'ingénieurs dans la région, un diagnostic qui est confirmé par le fait que, si de nombreux pays de l'OCDE³⁴ comme l'Italie, le Portugal, l'Espagne et les États-Unis ont exprimé des préoccupations concernant la pénurie d'étudiants en ingénierie, ils « exportent » des services d'ingénierie par le biais de contrats attribués au niveau mondial. Cependant, les pays d'ALC engagent généralement des entreprises étrangères pour concevoir ou effectuer de grands travaux d'infrastructure, ce qui indique non seulement le besoin de professionnels supplémentaires, mais aussi le manque d'entreprises disposant des capitaux propres ou du savoir-faire nécessaires pour entreprendre les grands contrats d'infrastructure d'ALC.

Progrès des sciences de l'ingénieur et solutions aux défis régionaux

Enseignement des sciences de l'ingénieur

Selon le Panorama de l'enseignement supérieur en Amérique latine (2018) de Red Indices, le nombre plus faible de diplômés en ingénierie en Amérique latine est le produit de l'investissement plus élevé requis pour la formation des ingénieurs et des scientifiques, ainsi que de l'accent mis par les universités d'ALC sur les sciences humaines.

Néanmoins, le nombre futur d'ingénieurs établi à partir du nombre actuel d'étudiants de l'enseignement supérieur dans les secteurs de l'ingénierie, de la construction et de la fabrication est très prometteur. Selon le rapport de Red Indices, les formations liées aux métiers de « l'ingénierie, l'industrie et la construction » arrivent au deuxième rang des formations les plus prisées par les étudiants. On note une hausse considérable du nombre d'étudiants dans ces formations au Chili et en Colombie, où elles attirent jusqu'à 20 % des nouveaux étudiants, dans un contexte d'augmentation générale de 3,8 % des étudiants du supérieur pour la période 2010-2015. Le nombre d'étudiantes a également augmenté au cours de cette période et les femmes comptent désormais pour 55 % de l'ensemble des étudiants de l'enseignement supérieur en ALC. Toutefois, une telle augmentation ne se traduit pas nécessairement par un pourcentage plus élevé de femmes ingénieures (encadré 1).

Malgré la hausse actuelle du nombre d'étudiants en ingénierie dans les pays de la région ALC, le nombre d'ingénieurs n'est toujours pas suffisant pour répondre aux besoins potentiels de la région.

Rôle des organisations professionnelles d'ingénieurs en Amérique latine et dans les Caraïbes

Différents organismes d'ingénierie coexistent en ALC et sont composés d'organismes nationaux de réglementation de l'ingénierie et d'associations professionnelles d'ingénieurs qui se sont vu attribuer un rôle clé dans la mise en œuvre des actions nécessaires à la réalisation des ODD. Ces organismes comprennent plusieurs organisations régionales et transrégionales placées sous l'égide de la Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs (FMOI).

Depuis 1949, l'Union panaméricaine des associations d'ingénieurs (UPADI) promeut la formation des ingénieurs à l'échelle de la région ainsi que la pratique professionnelle au sein des entreprises d'Amérique latine et des Caraïbes, et s'efforce de contribuer au bien-être des communautés. Basée à Rio de Janeiro, l'UPADI organise des congrès chaque année et fait part de ses observations à la FMOI.

En outre, le Conseil des organisations professionnelles de génie civil des pays lusophones et hispanophones (CICPC), une organisation interrégionale plus jeune fondée en 1992, se concentre sur l'évaluation des défis actuels des pays membres afin de fournir une vision régionale et de proposer des principes d'action conjointe globale à la communauté de l'ingénierie civile. Le tableau 1 dresse la liste des pays membres de ces deux organisations.

Tableau 1. Membres de l'UPADI et du CICPC

| | UPADI | CICPC |
|---|---|--|
| Pays d'ALC | Argentine, Bolivie, Brésil, Chili, Colombie, Costa Rica, Cuba, République dominicaine, Équateur, El Salvador, Guatemala, Honduras, Mexique, Nicaragua, Panama, Paraguay, Pérou, Puerto Rico, Uruguay, Venezuela | |
| Pays et régions en dehors de l'Amérique latine et des Caraïbes | Portugal, Espagne | |
| | Canada, États-Unis d'Amérique, Italie | Andorre, Angola, Cabo Verde, Guinée-Bissau, Guinée équatoriale, Macao, Mozambique, Sao Tomé-et-Principe, Timor-Leste |

L'incertitude économique dans la région ALC, où les pays subissent des crises économiques récurrentes, exige un flux important d'ingénieurs des pays en crise vers les économies plus dynamiques de la région, qui reviennent lorsque l'économie du pays hôte décline. La plus grande partie de ce flux est informel et pèse à la fois sur le développement de la carrière des ingénieurs d'ALC et sur la croissance des sociétés d'ingénierie. La nécessité d'établir des procédures formelles de mobilité professionnelle dans le secteur de l'ingénierie, bien qu'abordée par l'UPADI et

34 L'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) est une organisation économique intergouvernementale comptant 37 États membres. Site Web officiel : <https://www.oecd.org/fr/>

L'ingénierie au service du développement durable

le CICPC, est spécifique au CIAM³⁵, une plateforme hébergée par les gouvernements du MERCOSUR³⁶. Le CIAM travaille à la mise en place d'un cadre pour réglementer les services professionnels transfrontaliers et l'octroi de licences dans les pays membres du MERCOSUR pour le secteur de l'ingénierie.

Encadré 1. Un projet en faveur de l'égalité des sexes dans le domaine de l'ingénierie en Argentine

En Argentine, les femmes occupent 20 % des postes d'ingénieur, un chiffre en constante augmentation et qui pourrait s'élever à 25 %. En revanche, selon le syndicat de la construction du pays, l'UOCRA, le nombre de femmes prenant part à des travaux de construction est passé sous la barre des 5 %. Parmi elles, 20 % effectuent des tâches liées à la maçonnerie. Par conséquent, la part de postes d'ingénieurs occupés par des femmes est ramenée à 4 %, ce qui se traduit par un environnement essentiellement masculin tant durant les phases de conception, que de gestion et de passation de marchés.

Pour remédier à cette situation, la branche argentine d'Ingénieurs sans frontières, ISF-Ar, met en place des projets qui intègrent une approche neutre du point de vue du genre afin d'encourager la participation des femmes et de parvenir à la parité femmes-hommes.

Cette initiative a permis de banaliser la présence des femmes sur les chantiers de construction ainsi que de confirmer leur capacité à entreprendre des travaux de construction pendant les phases de conception, de gestion et d'exécution, tout en présentant des exemples à suivre aux jeunes filles qui souhaitent intégrer le génie civil.

pourraient permettre de remédier aux pénuries de main-d'œuvre professionnelle dans les pays en développement.

Recommandations

1. Renforcement de la Coopération Sud-Sud et de la coopération triangulaire³⁷ dans les projets d'ingénierie, de manière à favoriser le transfert de connaissances dans la région (PNUD, 2017). Compensation du manque d'investissement et d'expertise grâce à la facilitation des contributions régionales et mise en place d'une coopération horizontale (Sud-Sud) et triangulaire.
2. Mise en place de cadres visant à améliorer la mobilité des étudiants en ingénierie pour leur donner l'occasion d'enrichir et de partager leurs connaissances et leur expérience au sein d'établissements et d'organisations de différents pays d'ALC. Encouragement des activités de promotion dans la région afin de promouvoir la mobilité et contribuer à instaurer une culture de l'ingénierie en Amérique latine et dans les Caraïbes à même de relever les défis régionaux et mondiaux.
3. Mise en place de cadres de mobilité professionnelle intrarégionaux et interrégionaux constituant une première étape vers la promotion de normes mondiales de mobilité temporaire et le renforcement des systèmes de coopération.

Conclusion

Les pays d'Amérique latine et des Caraïbes doivent s'attaquer à un certain nombre de problèmes relatifs à l'environnement et au développement pour exploiter le potentiel de la région et réaliser les ODD. À cette fin, des solutions d'ingénierie sont disponibles, mais elles sont entravées par le nombre insuffisant de professionnels de l'ingénierie dans la région ou la capacité limitée de ses entreprises. Par conséquent, des efforts doivent être faits pour accroître le nombre de professionnels de l'ingénierie en ALC. Cela oblige les gouvernements et les universités d'ALC à promouvoir les programmes d'ingénierie, en accordant une attention particulière à la participation des femmes, qui sont sous-représentées. En collaboration avec leurs homologues internationales, les organisations nationales et régionales d'ingénieurs d'ALC doivent contribuer à promouvoir les carrières d'ingénieurs, en les reliant à la réalisation des ODD. Elles doivent également promouvoir l'amélioration des systèmes de mobilité professionnelle qui

35 Comisión para la Integración de la Agrimensura, Agronomía, Arquitectura, Geología e Ingeniería del MERCOSUR [Commission du MERCOSUR pour l'intégration de la topographie, de l'agronomie, de l'architecture, de la géologie et de l'ingénierie].

36 Le MERCOSUR est le marché commun du Sud, un bloc économique composé de 5 États parties. Site Web officiel : <https://www.mercosur.int>

37 La Coopération Sud-Sud désigne la « coopération mutuelle de pays en développement, orientée vers leur développement autonome, et dans laquelle ces pays mènent une coopération technique et économique tout en approfondissant leur collaboration réciproque ». La coopération triangulaire implique des « partenariats dirigés et animés par les acteurs Sud, entre deux ou plusieurs pays en développement, appuyés par un ou plusieurs pays développés ou une ou plusieurs organisations multilatérales, afin de mettre en œuvre des programmes et projets de coopération au développement » (PNUD, 2017).

Références

- Abramian, J. 2020. How many of us, civil engineers, are enough? Madrid, Conseil mondial des ingénieurs civils. <https://wcce.biz/index.php/2-wcce/362-a-column-how-many-of-us-civil-engineers-are-enough>
- CEPALC. 2018. Étude sur la situation économique de l'Amérique latine et des Caraïbes (2018). Evolution of investment in Latin America and the Caribbean: stylized facts, determinants and policy challenges. Santiago : Commission économique pour l'Amérique latine et les Caraïbes. www.cepal.org/en/publications/43965-economic-survey-latin-america-and-caribbean-2018-evolution-investment-latin
- Huber, K. 2018. Resilience strategies for wildfire. Center for Climate and Energy Solutions. <https://www.c2es.org/site/assets/uploads/2018/11/resilience-strategies-for-wildfire.pdf>
- Iorio, P. et Sanin M.E. 2019. Acceso y asequibilidad a la energía eléctrica en América Latina y el Caribe. [Accès et disponibilité de l'énergie électrique en Amérique latine et dans les Caraïbes]. Washington, Banque interaméricaine de développement (en espagnol).
- Milesi, O. et Jarroud M. Soil degradation threatens nutrition in Latin America. *Inter Press Service*, 15 juin. <https://reliefweb.int/report/world/soil-degradation-threatens-nutrition-latin-america>
- Nurse, L.A., McLean, R.F., Agard, J., Briguglio, L.P., Duvat-Magnan, V., Pelesikoti, N., Tompkins, E. et Webb, A. 2014. Small islands. Dans : V.R. Barros, C.B. Field, D.J. Dokken, *et al.* (dir.publ.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional aspects*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, pp. 1613 - 1654. Cambridge, R-U/New York, Cambridge University Press.
- OCHA. 2020. Natural Disasters in Latin America and the Caribbean 2000–2019. Balboa, Ancon, Panama, Bureau des Nations Unies pour la coordination des affaires humanitaires. https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/20191203-ocha-desastres_naturales.pdf
- OMS/UNICEF. 2019. *Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000–2017*. World Health Organization / United Nations Children's Fund Joint Monitoring Programme for Water Supply and Sanitation [Programme commun de surveillance de l'approvisionnement en eau et de l'assainissement de l'Organisation mondiale de la Santé et du Fonds des Nations Unies pour l'enfance]. <https://www.unwater.org/publications/whounicef-joint-monitoring-program-for-water-supply-sanitation-and-hygiene-jmp-progress-on-household-drinking-water-sanitation-and-hygiene-2000-2017/>
- PNUD. 2017. FAQ *South-South Cooperation and Triangular cooperation*. https://www.undp.org/content/undp/en/home/librarypage/poverty-reduction/development_cooperationandfinance/frequently-asked-questions--south-south-cooperation.html
- Red Indices. 2018. Panorama de la educación superior en Iberoamérica [Panorama de l'enseignement supérieur en Ibéro-Amérique] (en espagnol). www.redindices.org/attachments/article/85/Panorama%20de%20la%20educaci%C3%B3n%20superior%20iberoamericana%20versi%C3%B3n%20Octubre%202018.pdf
- UN Habitat, 2015. *Déficit habitacional en América Latina y el Caribe: Una herramienta para el diagnóstico y el desarrollo de políticas efectivas en vivienda y hábitat*. [Déficit de logements en Amérique latine et dans les Caraïbes : un outil pour le diagnostic et l'élaboration de politiques efficaces en matière de logement et d'habitat]. Nairobi, UN Habitat (en espagnol). <https://unhabitat.org/sites/default/files/download-manager-files/D%C3%A9ficit%20habitacional.pdf>

**Yashin Brijmohan³⁸, Gertjan van Stam³⁹
et Martin Manuhwa⁴⁰**

5.5 AFRIQUE



© Sunshine Seeds / Shutterstock.com

- 38 Ancien président du Comité pour le renforcement des capacités en ingénierie de la FMOI ; Doyen de la Faculté de commerce, d'ingénierie et de technologie, Université Monash, Afrique du Sud.
- 39 Université nationale de sciences et technologies, Zimbabwe.
- 40 Président de la Fédération des organisations d'ingénieurs en Afrique (FAEO).

Résumé. Ce chapitre plaide en faveur de meilleures solutions d'ingénierie pour l'Afrique en décrivant et en explorant l'état actuel de l'ingénierie en Afrique et ses contextes et priorités difficiles à la lumière des Objectifs de développement durable (ODD). Il met en évidence les défis auxquels l'Afrique est confrontée en matière d'urbanisation, d'emploi, de sécurité alimentaire, hydrique et énergétique, de dégradation de l'environnement, de changement climatique, de catastrophes naturelles et de pauvreté, et montre comment l'ingénierie peut aider la région à relever ces défis. Ce chapitre montre comment l'ingénierie est la clé de la réalisation des ODD pour l'Afrique. Il est donc avancé qu'une formation de qualité en ingénierie et des normes améliorées créeront de bons emplois et une croissance économique qui mèneront à l'« Agenda 2063 de l'Union africaine : L'Afrique que nous voulons ».

Introduction

Le continent africain est la deuxième plus grande masse terrestre du monde et abrite une richesse de cultures, ainsi que de politiques et de stratégies. Le développement économique varie considérablement entre les 54 nations souveraines de l'Afrique. Cependant, en tant que continent, l'Afrique s'est engagée à mettre en œuvre une vision de la prospérité : l'Agenda 2063 de l'Union africaine⁴¹. Le patrimoine culturel africain a en partage une orientation vers les communautés, l'inclusion, la paix, la convivialité et les partenariats à long terme.

Ce chapitre décrit l'ingénierie en Afrique et ses contextes et priorités difficiles à la lumière des Objectifs de développement durable (ODD). L'Afrique a une population jeune et est confrontée à toute une série de défis en matière d'inégalité, d'équité, de prestation de services et de justice. Il existe des difficultés bien connues liées à la fourniture d'une couverture médicale universelle et d'une éducation de qualité, à la valorisation des ressources naturelles et des infrastructures, ainsi qu'à la nécessité reconnue de créer des villes durables et de proposer une réponse globale aux calamités résultant de la crise climatique, des migrations, des pandémies ou des conflits armés. Le co-développement est en effet nécessaire pour élaborer des solutions appropriées. Comme l'a noté le rapporteur spécial sur l'extrême pauvreté et les droits de l'homme, Philip Alston, dans son rapport à l'Assemblée générale des Nations Unies, « pour réduire les dommages causés par des hypothèses et des choix de

conception erronés, [...] les systèmes devraient être co-conçus par les utilisateurs visés et évalués de manière participative » (Alston, 2019).

Questions régionales en Afrique

Questions sociales et développement

Le besoin de meilleures solutions techniques est mis en évidence dans le rapport *2020 Africa SDG Index and Dashboards* (index et tableau de bord), qui fournit une évaluation de la situation des pays africains par rapport aux Objectifs de développement durable et de leurs progrès vers les objectifs, avec l'objectif supplémentaire de « ne laisser personne pour compte » (figure 1). Ce rapport comprend également une analyse préliminaire de l'impact de la COVID-19 sur les ODD en Afrique, qui décrit cette crise humanitaire et économique ayant de graves répercussions immédiates et à long terme, notamment sur les objectifs sociaux et économiques. Le rapport estime qu'environ 60 millions d'Africains pourraient être poussés dans la pauvreté et que l'insécurité alimentaire devrait presque doubler. On estime que 110 millions d'enfants et de jeunes africains ne sont déjà plus scolarisés, que les systèmes de santé fragiles sont sous pression et que les femmes risquent d'être laissées pour compte encore plus qu'auparavant (SDG Center for Africa, 2020). Le ralentissement économique et les goulets d'étranglement devraient également accroître le chômage et la dette, tandis que la diminution des envois de fonds, de l'aide au développement et des recettes intérieures constitue un risque supplémentaire pour le financement du développement et les Objectifs de développement durable. Il est temps que l'Afrique devienne plus autonome et plus innovante grâce à des solutions d'ingénierie durables et à l'application de l'expertise locale et de ses abondantes ressources naturelles.

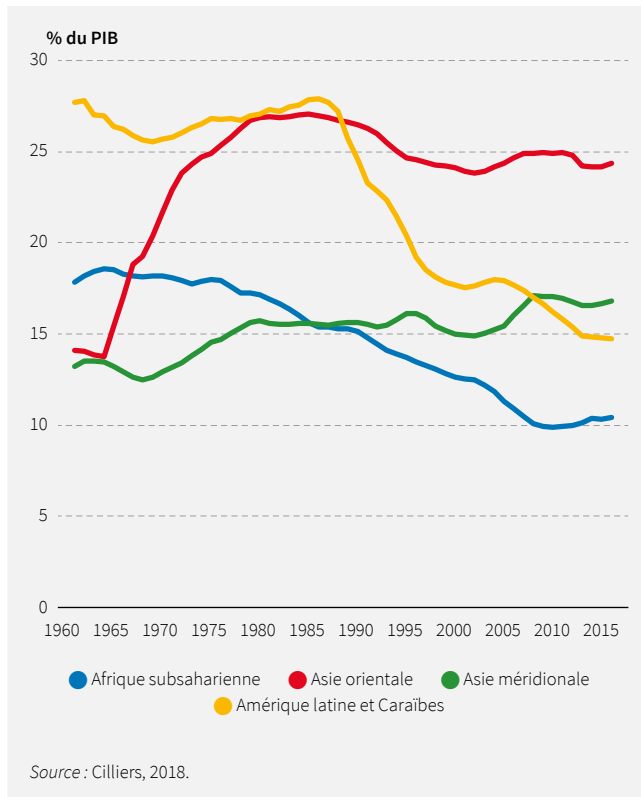
41 Pour plus de renseignements sur l'Agenda 2063 : <https://au.int/fr/agenda2063/vue-ensemble>

Figure 1. Défis à relever pour ne laisser personne pour compte, en particulier en Afrique



Source : ONU, 2019.

Figure 2. Production industrielle en proportion du PIB par régions du monde



ceux-ci, des études et des rapports montrent que les niveaux de revenus en Afrique subsaharienne sont sensiblement inférieurs à ceux de nombreux autres pays du monde. Les économies africaines formelles reposent principalement sur les industries extractives, tandis qu'une bonne partie de la population dépend de l'agriculture dans un cadre informel. L'Afrique est fortement tributaire des importations de machines. Sa part de production industrielle, en proportion du PIB, est nettement inférieure à celle du reste du monde (figure 2).

Compte tenu de la relation étroite entre les diplômés en sciences de l'ingénierie et la croissance économique, plusieurs pays d'Afrique considèrent que les sciences, la technologie, l'ingénierie et les mathématiques (STEM) sont cruciales pour le développement. Les capacités et les compétences en matière d'ingénierie et de technologies de l'information et des communications (TIC) sont une composante essentielle de la quatrième révolution industrielle, dans le cadre de laquelle l'automatisation, l'intelligence artificielle, l'Internet industriel et les mégadonnées constituent les moteurs de l'économie. À l'heure actuelle, en dehors des mégapoles africaines, cette révolution est naissante dans la plupart des pays africains. Dans les zones rurales, en particulier, où résident la plupart des populations, la deuxième révolution – l'énergie électrique – et la troisième – l'utilisation de l'électronique – ne sont pas encore en marche (Naudé, 2017). En attendant, les éléments fondamentaux de la quatrième révolution tels que les plateformes numériques – autour desquelles s'articulent les domaines numériques – semblent faire défaut en Afrique (Ministère des affaires étrangères, 2018 ; Rodrik, 2018). D'après la CNUCED (2019), deux pays, à savoir la Chine et les États-Unis, représentent environ 90 % des

La liste des défis auxquels l'Afrique est confrontée comprend l'urbanisation, l'emploi, la sécurité alimentaire, hydrique et énergétique, la dégradation de l'environnement, le changement climatique, les catastrophes naturelles et la pauvreté. L'ingénierie peut aider la région à relever ces défis. Bien qu'il existe de grands écarts entre les pays africains et au sein de

70 premières plateformes numériques. L'Afrique et l'Amérique latine réunies n'en représentent qu'un pour cent. En raison d'un passé difficile, la plupart des informations transmises d'un point d'Afrique à un autre passent par l'Europe (Gueye et Mbaye, 2018).

L'électricité fait partie intégrante des infrastructures modernes, au même titre que la disponibilité de bâtiments de bonne qualité et d'eau potable. Cependant, dans de nombreuses régions d'Afrique, l'électricité n'est pas facilement disponible. En mettant en perspective l'approvisionnement et l'utilisation de l'électricité en Afrique, l'Africa Progress Panel a noté⁴² qu'« il est choquant de constater que la consommation d'électricité de l'Afrique subsaharienne est inférieure à celle de l'Espagne et que, si la tendance actuelle se confirme, il faudra attendre 2080 pour que chaque Africain ait accès à l'électricité » (Africa Progress Panel, 2015, p. 11). Dans la plupart des pays africains, l'offre d'électricité est inférieure à la demande. Dans les zones rurales d'Afrique subsaharienne, l'approvisionnement en électricité est souvent inexistant ou irrégulier, avec de fréquentes coupures de courant (Mudenda, Johnson, Parks et van Stam, 2014).

Bien entendu, les pays africains comptent de nombreuses universités, tant publiques que privées, dont beaucoup produisent d'excellents travaux de recherche et de développement. Néanmoins, les Africains sont pour la plupart absents du domaine de la conceptualisation des technologies mondiales, comme en témoignent les événements relatifs à la 5G (van Stam, 2016). Les pratiques internationales établies parlent de l'Afrique plutôt qu'avec l'Afrique, les voix africaines étant rarement entendues dans les débats. Pour se débarrasser des pratiques héritées du colonialisme et se concentrer sur les besoins et les solutions locaux, les programmes d'études et la recherche et le développement se tournent vers une opportunité intégrative et dynamique pour les communautés locales et nationales (Bigirimana, 2017). Par exemple, les principes qui sous-tendent la recherche au centre universitaire international de Kampala, en Ouganda, s'articulent autour de la « collaboration en contexte », renforçant ainsi la position de chef de file de cet établissement au sein du réseau de données sur les épidémies de virus (VODAN), qui gère les données sur la pandémie de COVID-19 en Afrique dans le respect des principes de la souveraineté des données. Toutefois, ces initiatives courageuses sont entravées par une dépendance excessive à l'égard de l'expertise et des financements provenant de l'extérieur du continent.

Dégradation de l'environnement

Au cours des dernières décennies, les pays africains ont souffert de divers problèmes, notamment d'une forte croissance démographique, de multiples conflits armés, de catastrophes naturelles, de maladies épidémiques et d'instabilité politique. Ces problèmes ont laissé des traces sur le continent au niveau

environnemental. En outre, d'autres menaces telles que le changement climatique, l'urbanisation souvent incontrôlée, la déforestation, la pollution (de l'atmosphère, de l'eau ou du sol) et les conflits fonciers, contribuent toutes à la détérioration de l'environnement du continent. Face à cette situation, les pays africains doivent déployer des initiatives pour éradiquer certaines des causes de cette dégradation écologique. Le développement des sciences et de l'ingénierie de l'environnement devrait permettre à l'Afrique de disposer d'un capital humain capable de fournir des connaissances sur les lois de la nature, de proposer des stratégies d'intervention et de développer des technologies vertes utilisables sur le continent.

Changement climatique et risques naturels

Le changement climatique et les catastrophes naturelles ont un effet profond sur les secteurs de développement et les sociétés en Afrique. Dans les faits, le changement climatique et l'intensification hydroclimatique qui lui est associée, notamment, affectent toutes les composantes du cycle hydrologique et à toutes les échelles pertinentes pour l'activité humaine.

Au cours des dernières décennies, l'Afrique, en particulier l'Afrique de l'Ouest, a connu certains des événements climatiques les plus extrêmes au monde, ce qui a compliqué la mise en œuvre de différents cadres de réduction des risques de catastrophes (cadres de Hyogo et de Sendai) et la réalisation des ODD. Ces événements extrêmes créent des défis particuliers dans les contextes urbains où un meilleur accès à des informations fiables et pertinentes est essentiel pour soutenir une planification efficace en matière de préparation, de réponse, d'atténuation et d'adaptation. L'amélioration des compétences des prévisionnistes à court et à long terme peut permettre une meilleure préparation aux risques liés au climat. En outre, les nouvelles conditions climatiques, hydrologiques, environnementales et sociétales que connaissent les différentes régions d'Afrique depuis plusieurs décennies ne sont pas prises en compte dans les outils de conception, ce qui entraîne un sous-dimensionnement et un surdimensionnement des infrastructures hydrauliques, générant de nouveaux coûts et matériels, ainsi que des dommages humains lors de phénomènes climatiques extrêmes. Les ingénieurs doivent développer des outils de conception adaptés pour relever ce défi, tenant compte des signaux forts observés et projetés sur le climat, ainsi que des changements importants dans les conditions et l'utilisation des terres.

Eau, nourriture et sécurité énergétique

L'Afrique est confrontée à de nombreux défis, qui entravent sérieusement son développement socioéconomique. La question de la sécurité alimentaire, hydrique et énergétique reste l'une des préoccupations majeures des pays africains. Avec une population

42 Pour plus de renseignements sur le travail de l'Africa Progress Panel : <https://africaprogessgroup.org>

L'ingénierie au service du développement durable

estimée à plus de deux milliards d'habitants en 2050, soit près de 25 % de la population mondiale, l'Afrique devra mettre en place des politiques fortes et des initiatives innovantes pour assurer le bien-être de sa population dans un environnement de plus en plus hostile marqué par les aléas climatiques et l'insécurité à l'échelle régionale. L'Afrique doit tirer le meilleur parti de son dividende démographique, en développant son capital humain et un enseignement de qualité. Une population de plus en plus jeune (plus de 60 % des jeunes ont moins de 25 ans), bien éduquée et formée, est en mesure de générer une nouvelle dynamique de développement et d'accélérer la croissance économique.

L'insécurité alimentaire et énergétique prononcée en Afrique exige notamment la construction d'ouvrages et d'installations hydrauliques respectant des normes de conception hydrologique adéquates. Pour relever également le défi de la sécurité alimentaire en Afrique, il sera nécessaire de mettre l'accent sur l'esprit d'entreprise agricole des jeunes Africains.

Le développement des domaines de formation et de recherche en sciences et technologies de l'eau, de l'agriculture, de l'énergie et de l'ingénierie environnementale fournira ainsi à l'Afrique des ingénieurs et des gestionnaires hautement compétents pour relever les défis dans ces secteurs stratégiques de développement.

L'environnement pour l'ingénierie en Afrique

Tendances technologiques de l'ingénierie

Pour construire une Afrique meilleure, un nouveau paradigme axé sur le renforcement des capacités et la mobilisation des parties prenantes est nécessaire pour créer des stratégies permettant d'atteindre les Objectifs de développement durable. La Fédération des organisations d'ingénieurs en Afrique (FAEO), par le biais de son accord avec le département des ressources humaines, de la science et de la technologie de la Commission de l'Union africaine (UA), envisage la mise en œuvre de solutions d'ingénierie dans la Stratégie 2024 pour la science, la technologie et l'innovation en Afrique (STISA-2024) en se servant de l'ingénierie comme tremplin pour les infrastructures, les innovations technologiques et les solutions appropriées afin d'offrir l'Afrique que nous voulons, comme le stipule l'Agenda 2063 de l'UA (Manuhwa, 2020).

L'alignement sur les tendances mondiales qui incluent les mégadonnées, l'intelligence artificielle, les progrès en matière de communications et d'énergie, la robotique et la fabrication d'additifs, ainsi que le besoin urgent de développer les infrastructures de base, exerce une pression importante sur les capacités et les solutions créatives de l'Afrique. Il existe toute une série de technologies et de pratiques particulièrement adaptées aux contextes africains. On peut citer par exemple l'exploration du spectre dynamique (ICASA, 2020) et l'utilisation des espaces blancs de la télévision (Johnson et Mikeka, 2016).

Il existe de nombreux exemples de communautés impliquées dans la gestion de réseaux en Afrique (APC, 2018). Cette approche exige une formation et un perfectionnement constants des personnes impliquées dans le domaine de l'ingénierie aux niveaux local et mondial pour leur permettre de servir leurs communautés et de saisir de nouvelles opportunités au niveau mondial. En outre, les TCI sont à même de contribuer aux économies africaines et sont essentielles au renforcement des capacités basé sur les services en ligne. L'utilisation de sources d'énergie renouvelables et alternatives constitue également un autre domaine en croissance en Afrique. Le continent se caractérise par une abondance d'énergie solaire, d'énergie hydroélectrique et d'énergie éolienne, tandis que l'accent y est mis sur l'interconnectivité, comme le montre la mise en commun de l'énergie électrique dans différentes parties de l'Afrique.

L'utilisation et l'intégration des services monétaires numériques montrent que l'Afrique peut faire l'impasse sur les industries. À titre d'exemple, on peut citer l'assemblage local de voitures, de télévisions ou de téléphones portables à l'aide d'outils de gestion de pointe. Étant donné l'abondance des ressources naturelles et de la main-d'œuvre, il est probable que l'Afrique privilégie de plus en plus la valorisation. Les exercices de planification de scénarios associés indiquent le potentiel de croissance du PIB de l'Afrique, qui se traduira par la création d'emplois et une réduction de la pauvreté (tableau 1). L'industrialisation nécessite d'être appuyée par des politiques gouvernementales justes, des TIC appropriées, une production industrielle locale, la disponibilité de l'énergie et des moyens de transport. Cette évolution exige des capacités suffisantes en matière d'ingénierie et de science, ainsi qu'une transformation continue.

Tableau 1. Comparaison des taux de croissance du PIB selon les scénarios

| Région | Moyenne de la trajectoire actuelle jusqu'en 2040 | Moyenne des produits fabriqués en Afrique jusqu'en 2040 |
|--|--|---|
| Afrique | 4,8 % | 6,5 % |
| Pays d'Afrique à faible revenu | 7,2 % | 8,9 % |
| Pays d'Afrique à revenu moyen et intermédiaire | 4,7 % | 6,4 % |
| Pays d'Afrique à revenu intermédiaire de la tranche supérieure | 3,8 % | 5,3 % |

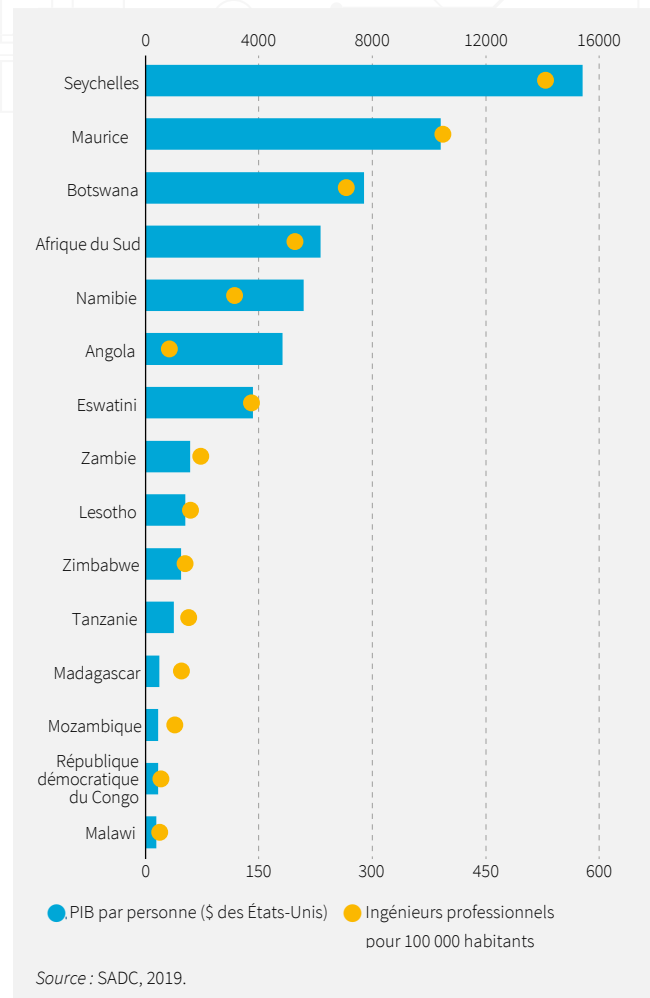
Source : Cilliers, 2018.

La transformation en cours des capacités d'ingénierie comprend l'élaboration et l'alignement de l'enseignement sur les besoins locaux et professionnels, la mobilité et les cadres réglementaires nationaux et internationaux appropriés. Les besoins locaux et les tendances mondiales ont suscité de nouvelles attentes : les diplômés doivent être capables de mener des activités de recherche et de développement adaptées au contexte et posséder des compétences professionnelles reconnues au niveau international. Les ingénieurs contribuent de manière déterminante à préparer la société en général et d'autres professions, en les aidant à s'adapter à un monde du travail diversifié en réalisant une synthèse harmonieuse entre les besoins locaux et nationaux et les avancées technologiques de la société mondiale.

En Afrique, la compréhension et l'harmonisation des normes d'enseignement de l'ingénierie, leur adéquation avec la demande locale et nationale, et la qualité des diplômés en ingénierie à l'aune des normes internationales restent des questions ouvertes. Un seul pays, l'Afrique du Sud, est actuellement signataire de l'International Engineering Alliance (IEA) concernant les accords de formation et de mobilité. Cette situation est encore aggravée par le nombre relativement faible de diplômés en ingénierie, nettement inférieur à la moyenne par habitant en dehors de l'Afrique. Plusieurs recherches entreprises ont mis en évidence « le manque de données ventilées pour l'ingénierie dans le monde, avec même une ventilation par profession pour l'ingénierie dans son ensemble dans de nombreux cas, sans parler de l'éventail des disciplines d'ingénierie » (Académie royale d'ingénierie, 2016). Cette situation est particulièrement prononcée en Afrique, et sans les données nécessaires pour comprendre dans quelle mesure les pays africains sont « bien pourvus » d'ingénieurs de qualité suffisante, il est plus difficile de garantir l'émergence d'un nombre suffisant d'ingénieurs bien qualifiés pour répondre à la croissance de la demande qui est inévitable à mesure que les économies se développent, mûrissent et cherchent de nouveaux moyens de parvenir à la croissance économique, ce qui est noté dans la même étude de l'Académie royale d'ingénierie de 2016. Le département des sciences et de la technologie d'Afrique du Sud a commandé une étude des besoins et des chiffres au nom de la Communauté de développement de l'Afrique Australe (SADC) pour le compte de ses États membres.

La figure 3 indique le nombre d'ingénieurs par rapport à la population et le PIB par habitant pour certains pays d'Afrique. Si la corrélation semble indiquer que davantage d'ingénieurs sont nécessaires pour augmenter le PIB, l'inverse est vrai : une hausse des investissements est nécessaire dans l'activité d'ingénierie pour stimuler les économies et permettre à plus d'ingénieurs de réellement trouver des emplois dans les industries et les services concernés.

Figure 3. PIB par habitant en 2016 par rapport au nombre d'ingénieurs praticiens pour 100 000 habitants



Semaine de l'ingénierie en Afrique de l'UNESCO

En 2014, la Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs (FMOI) et la Fédération des organisations d'ingénieurs en Afrique (FAOI) se sont associées à l'UNESCO pour lancer la Semaine de l'ingénierie en Afrique, une plateforme qui permet au continent africain de promouvoir l'importance de l'ingénierie auprès des responsables politiques, du grand public et des professionnels du domaine. Cette plateforme a donné naissance à la Conférence africaine sur l'ingénierie, créée en vue de discuter de questions essentielles concernant l'ingénierie et convenir de résolutions communes. La première Semaine de l'ingénierie en Afrique s'est tenue à Johannesburg, en Afrique du Sud, en 2014 ; la deuxième au Zimbabwe, en 2015 ; la troisième au Nigéria, en 2016 ; la quatrième au Rwanda, en 2017 ; la cinquième au Kenya, en 2018, et la sixième à Livingstone, en Zambie, en 2019. La Semaine de l'ingénierie en Afrique de l'UNESCO a connu un succès retentissant, ayant rassemblé des gouvernements, des

L'ingénierie au service du développement durable

organisations professionnelles d'ingénieurs, des organismes éducatifs, des parties prenantes internationales et du grand public. Elle a non seulement incité les apprenants à se lancer dans des carrières d'ingénieur, mais elle s'est également attachée à promouvoir l'ingénierie auprès des filles et des jeunes femmes, et a permis de partager des solutions d'ingénierie et de sensibiliser les praticiens, la société, les dirigeants et les organisations internationales. Cette semaine a également renforcé la visibilité de la FAOI, de l'UNESCO et de la FMOI, en offrant un environnement dans lequel le travail et les activités de ces organisations peuvent être promus sur tout le continent africain.

Parmi les gouvernements africains, il est davantage question de prendre son destin en main et d'affirmer sa souveraineté, en particulier au regard des réalités géopolitiques et de la contestation croissante des technologies. Grâce à diverses initiatives, les pays ont mis en place des politiques globales, des cadres réglementaires, des stratégies de collaboration et des mécanismes institutionnels pour l'engagement communautaire, le renforcement de la main-d'œuvre et le transfert de technologies, notamment dans les domaines de l'ingénierie. L'ingénierie est considérée comme un moyen de renforcer la croissance économique, la coopération régionale et internationale et les partenariats, et de créer des synergies pour l'intégration politique sur le continent.

Équilibre dans la société, unité, partenariats et intégration

La population du continent est composée à 28 pour cent de jeunes âgés de 15 à 29 ans, dont une grande partie se trouve actuellement sans emploi, tandis que 40 % de la population de l'Afrique a moins de 15 ans. Selon le président de la FAOI, l'ingénieur Martin Manuhwa, « l'ingénierie est un ingrédient clé du développement économique, c'est pourquoi nous devons donner la priorité aux jeunes et les encourager à se lancer dans le domaine des sciences afin qu'ils disposent des outils nécessaires pour aider leur pays à se développer » (Académie royale d'ingénierie, 2016). Pour résoudre les problèmes locaux et contextuels liés aux infrastructures, il est essentiel d'attirer les jeunes vers les carrières d'ingénieur et de leur apporter un soutien. Cela favorisera également une conception, une exécution et un entretien durables des infrastructures au niveau local. En outre, avec une approche de ce type, il devient possible d'impulser de manière réfléchie⁴³ des solutions africaines. Enfin, comme sur d'autres continents, attirer les femmes dans la profession demeure une gageure et nécessitera d'entreprendre une action positive, en l'occurrence de mettre en place des politiques visant à encourager les jeunes femmes à choisir la carrière d'ingénieur.

Les barrières interculturelles et linguistiques constituent un autre obstacle aux partenariats intracontinentaux en Afrique. Toutefois, plusieurs initiatives sont en place pour améliorer les relations et les liens entre les pays. Les projets de coopération Sud-Sud, mis en place au sein des continents et entre eux, ouvrent des perspectives passionnantes, notamment compte tenu des similitudes historiques, de la symbiose culturelle et épistémologique (par exemple, Ubuntu et Buen Vivir), et des caractéristiques géographiques et écologiques de l'hémisphère Sud qui doivent être explorées, en particulier au regard de la crise climatique. L'enseignement et la pratique de l'ingénierie peuvent bénéficier de multiples modes de connaissance, en développant des compétences interculturelles pour permettre aux ingénieurs de servir leurs communautés dans un monde interconnecté.

Progrès des sciences de l'ingénieur pour répondre aux défis régionaux

Les défis auxquels l'Afrique est confrontée offrent de nombreuses opportunités, notamment dans les domaines de l'ingénierie, de la recherche et de l'innovation. Pour profiter de ces opportunités et contribuer à la résolution de ces défis, les pays africains doivent mettre en œuvre des réformes systémiques pour améliorer la qualité de l'éducation à tous les niveaux et professionnaliser leurs systèmes éducatifs afin d'éduquer et de former principalement les jeunes dans les domaines de la science, de la technologie et de l'ingénierie. Pour la transformation économique de l'Afrique, il sera donc impératif que les pays investissent stratégiquement dans l'éducation et la formation de la jeunesse africaine. Pour ce faire, il convient de mettre en place une synergie africaine afin de promouvoir une meilleure intégration régionale, d'une part, et de faire progresser la science et la technologie en Afrique, d'autre part.

Dans un article paru dans *Le Monde*, l'écrivaine Myriam Dubertrand a observé que l'Afrique subsaharienne est « en mal d'ingénieurs » et que pour que l'Afrique francophone réalise pleinement son potentiel, le continent doit mettre en place des partenariats, organiser la mise en réseau des chercheurs et des étudiants, et instaurer une collaboration et une co-construction avec d'autres écoles d'ingénieurs plus établies sur d'autres continents, comme la coopération avec la prestigieuse Conférence des grandes écoles⁴⁴ (CGE). On a constaté que sept établissements sont africains et qu'un seul est basé en Afrique subsaharienne : l'Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement (2iE) à Ouagadougou, au Burkina Faso (Dubertrand, 2016).

43 Van Stam (2016) définit le leadership éclairé comme un « contenu reconnu par d'autres comme innovant, couvrant les tendances et les sujets qui influencent une industrie ».

44 Association française d'établissements d'enseignement supérieur et de recherche prestigieux.

Conclusion

L'ingénierie est la clé de la réalisation des ODD pour l'Afrique. Une formation de qualité en ingénierie et des normes améliorées entraîneront la création de bons emplois et une croissance économique qui mèneront à l'Afrique que nous voulons. Les défis de l'Afrique subsaharienne sont communs aux pays francophones, lusophones et anglophones. Ils comprennent un accès réduit à une énergie abordable, une faible industrialisation, un manque de normalisation, des infrastructures inadéquates (en particulier dans le domaine des transports), une faible productivité, ainsi qu'une santé et un bien-être médiocres, autant de problèmes qui nécessitent des solutions d'ingénierie. Il existe maintenant des preuves de pratiques d'ingénierie et de renforcement des capacités locales qui sont mises en œuvre et qui offrent des solutions utilisant des technologies modernes, telles que les technologies industrielles 4.0 et d'autres technologies perturbatrices, comme en témoignent les interventions COVID-19, des institutions professionnelles et des universités locales (FAOI, 2020).

Recommandations

1. L'intégration de l'ingénierie locale, nationale et continentale est cruciale pour la conception, la construction et la maintenance de solutions africaines durables aux défis africains et mondiaux. L'engagement des communautés, des parties prenantes et des gouvernements est le fondement qui permet de garantir des capacités et une orientation adaptées dans le domaine de l'éducation et de l'entreprise professionnelle.
2. Pour renforcer les capacités africaines en matière d'ingénierie, il convient de mettre l'accent sur les défis locaux, régionaux, nationaux, et continentaux, ainsi que de s'intéresser aux professionnels du patrimoine culturel africain.
3. En effet, le développement des capacités d'ingénierie est une priorité pour le continent et nécessite la mise en place de politiques et de cadres réglementaires nationaux et internationaux, et la prise en compte prioritaire par les organisations professionnelles d'ingénieurs nationales et régionales des avantages à long terme pour le progrès et le bien-être de l'Afrique.
4. La direction et la participation de l'Afrique au développement technologique international (par exemple dans le cadre de la 6G) doivent être exploitées et appuyées.
5. La FAOI mérite d'être soutenue dans ses efforts visant à unifier la profession, renforcer les capacités et encadrer l'ingénierie à travers l'ensemble du continent.
6. L'orientation de la recherche et du développement africains vers l'élaboration de politiques est nécessaire afin de fournir aux gouvernements les preuves dont ils ont besoin pour attribuer une base juridique et des ressources permettant d'aligner la certification sur les normes continentales et mondiales, par exemple, et pour soutenir la mobilité des ingénieurs sur tout le continent.
7. Sans négliger la diversité et l'histoire culturelles, il s'avère particulièrement avantageux de mettre en place des programmes qui encouragent des relations de travail diversifiées (nationalités, sexes et sous-disciplines) et qui œuvrent au développement des compétences interculturelles des Africains, en particulier à l'appui des projets africains transnationaux dans la profession d'ingénieur.
8. Les pays devraient prendre des mesures urgentes pour augmenter le nombre d'ingénieurs en fonction des besoins de l'Afrique et combler le fossé entre les sexes dans le domaine de l'ingénierie.
9. Les pays devraient investir davantage dans l'ingénierie et mettre à niveau/renforcer les capacités de leurs établissements de formation d'ingénieurs.

Références

- Académie royale d'ingénierie, 2016. *Engineering and economic growth: a global view A report by Cebr for the Royal Academy of Engineering*. Londres, Académie royale d'ingénierie. <https://www.raeng.org.uk/publications/reports/engineering-and-economic-growth-a-global-view>
- Africa Progress Panel. *Power People Planet. Seizing Africa's energy and climate opportunities. Africa Progress Report 2015*. https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/APP_REPORT_2015_FINAL_low1.pdf
- Alston, P. 2019. Rapport du Rapporteur spécial sur l'extrême pauvreté et les droits humains. 74^e session de l'Assemblée générale de l'Organisation des Nations Unies. <https://undocs.org/fr/A/74/493>
- APC. 2018. *Global Information Society Watch 2018. Community networks*. Johannesburg, Afrique du Sud Association pour le progrès des communications et Centre de recherches pour le développement international (CRDI). <https://www.apc.org/en/pubs/global-information-society-watch-2018-community-networks>
- Bigirimana, S.S.J. 2017. Beyond the thinking and doing dichotomy: integrating individual and institutional rationality. *Kybernetes*, vol. 46, n° 2, pp. 1597 - 1610.
- Cilliers, J. 2018. *Made in Africa: Manufacturing and the fourth industrial revolution*. Pretoria, Afrique du Sud Institute for Security Studies.
- CNUCED. 2019. *Digital Economy Report 2019: Value creation and capture: implications for developing countries*. Conférence des Nations Unies sur le commerce et le développement. New York, Nations Unies. <https://unctad.org/webflyer/digital-economy-report-2019>
- Duberland, M. 2016. L'Afrique subsaharienne en mal d'ingénieurs. *Le Monde*, 27 octobre. https://www.lemonde.fr/afrique/article/2016/10/27/l-afrique-subsaharienne-en-mal-d-ingenieurs_5021166_3212.html
- FAOI. 2020. Covid 19 Pandemic and Engineering Solutions, Covid 19 Special Edition, September. Fédération des organisations d'ingénieurs en Afrique. https://faeo.org/wp-content/uploads/2020/11/FAEO-Sept-2020-Newsletter-COVID-19-Special-Edition_Reviewed.pdf
- Gueye, A. et Mbaye, B. 2018. On the prevalence of boomerang routing in Africa: Analysis and potential solutions. Papier présenté à la Conférence Internationale de l'EAI sur l'Innovation et les Solutions Interdisciplinaires pour les Zones Défavorisées (INTERSOL 2018), 24- 25 mars 2018, Kigali, Rwanda.
- ICASA. 2020. *Framework to qualify to operate a secondary geo-location spectrum database, 2020*. Independent Communication Authority of South Africa. www.icasa.org.za/legislation-and-regulations/framework-to-qualify-to-operate-a-secondary-geo-location-spectrum-database-2020
- Johnson, D.L. et Mikeka, C. 2016. Bridging Africa's broadband divide. *IEEE Spectrum*, vol. 53, n° 9, pp. 42 - 56.
- Manuhwa, M. 2020. *Engineering a post-Covid19 future*. 27^e conférence internationale de l'IEK et 3^e sommet des femmes ingénieures de l'IEK (24-26 novembre 2020).
- Ministère norvégien des affaires étrangères. 2018. *Transition and inclusive development in Sub-Saharan Africa: An analysis of poverty and inequality in the context of transition*. Étude de l'IOB. La Haye Ministère norvégien des affaires étrangères.
- Mudenda, C., Johnson, D.L., Parks, L. et van Stam, G. 2014. Power instability in rural Zambia, Case Macha. Dans : T.F. Bissyandé et G. van Stam (dir.publ.), *e-infrastructure and e-services for developing countries*. 5^e conférence internationale, AFRICOMM 2013, Blantyre, Malawi, 25-27 novembre 2013, documents sélectionnés révisés. Berlin, Heidelberg Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-08368-1_30.
- Naudé, W. 2017. The fourth industrial revolution in Africa: potential for inclusive growth? *The Broker*, 10 août. www.thebrokeronline.eu/the-fourth-industrial-revolution-in-africa-potential-for-inclusive-growth
- ONU. 2019. Data Disaggregation and SDG Indicators: Policy Priorities and Current and Future Disaggregation Plans. 50^e session de la Commission de statistiques du Groupe d'experts des Nations Unies et de l'extérieur chargé des indicateurs relatifs aux objectifs de développement durable. <https://unstats.un.org/unsd/statcom/50th-session/documents/BG-Item3a-Data-Disaggregation-E.pdf>
- Rodrik, D. 2018. An African growth miracle? *Journal of African Economies*, vol. 27, n° 1, pp. 10 - 27.
- SADC/DST. 2019. Engineering numbers and needs in the SADC region. Département des sciences et de la technologie, Afrique du Sud. <http://needsandnumbers.co.za/download/full-report/>
- SDG Center for Africa. 2020. *Africa SDG Index and Dashboards Report 2020*. Kigali et New York, Centre des Objectifs de développement durable pour l'Afrique et Réseau des solutions pour le développement durable.
- Van Stam, G. 2016. Africa's non-inclusion in defining fifth generation mobile networks. Dans : T.F. Bissyande et O. Sie (dir. publ.), *e-infrastructure and e-services for Developing Countries*. 8^e Conférence internationale de l'AFRICOMM 2016, Notes de conférence de l'Institut des sciences informatiques, de l'informatique sociale et de l'ingénierie des télécommunications, vol. 208, pp. 14 - 25. Springer.

Zainab Garashi⁴⁵

5.6 ÉTATS ARABES



© Zainab Garashi

Arab woman engineer receiving a prize

45 Ancienne présidente, jeunes ingénieurs de la FMOI/Comité de Future Leaders

Résumé. Les États arabes commencent à exploiter les données nationales internes avec les cadres politiques complets nécessaires pour effectuer des changements potentiellement spectaculaires qui feront correspondre le capital humain aux Objectifs de développement du gouvernement. Dans le même temps, ils cherchent à encourager des cultures de démarrage durables, la diversité et l'inclusion en mettant l'accent sur les femmes, ainsi qu'un plus grand impact des investissements visant des alternatives énergétiques responsables et respectueuses de l'environnement. La prochaine étape consistera à consolider la dynamique de changement et à permettre une mise en œuvre plus large dans les pays qui n'ont pas encore entamé ce processus, tout en renforçant la position de la région grâce à la coopération interrégionale.

Ingénierie, enseignement et qualité de l'enseignement

Dans son dernier *Rapport sur le développement dans le monde*, la Banque mondiale (2019) explique comment l'exploitation des données et la mise en place de cadres d'action générale permettent d'apporter des changements significatifs pouvant contribuer à atteindre les Objectifs de développement durable (ODD). Il s'agit notamment de concilier les objectifs de développement local et régional avec l'évolution des compétences, la nature de la production et le pouvoir de marché afin de développer le capital humain et d'améliorer la résilience ainsi que les infrastructures. Cette approche nécessite plus que les mesures indicatives d'amélioration classiques, telles que le ratio emploi-population en âge de travailler de l'Organisation internationale du Travail (OIT, 2018) ; elle exige le recours à des évaluations plus solides et plus proactives qui encouragent les jeunes et les orientent vers des carrières et des objectifs éducatifs conformes aux programmes gouvernementaux de développement.

À titre d'exemple, une étude menée par le Bureau du Vice-président chargé de l'urbanisation à l'Université du Koweït s'est penchée sur le nombre de diplômés en ingénierie issus de l'université par rapport à la demande en ingénieurs sur le marché du travail koweïtien et a établi des prévisions (couvrant les cinq prochaines années) (Khorshid et Alaiwy, 2016). Le marché présentait des écarts considérables en comparaison avec les plans stratégiques nationaux de développement ou de croissance tactique, malgré le

ratio emploi-population en âge de travailler exceptionnel (72,4 %) affiché par le Koweït (OIT, 2018). Les résultats de cette étude, bien que centrée sur le secteur de l'ingénierie au Koweït, ont révélé un motif récurrent dans d'autres secteurs, ce qui donne à penser que les taux élevés en matière d'éducation ainsi que les taux d'emploi qui en découlent ne sont peut-être pas suffisants pour répondre aux besoins actuels et futurs du développement au Koweït et dans la région.

Néanmoins, il convient également de souligner qu'il importe avant tout de fournir à la population une éducation de qualité, ainsi que des emplois pour les personnes ayant déjà reçu une éducation ; l'approche recommandée consiste en effet à aligner d'entrée de jeu les programmes d'enseignement et les formations sur les plans nationaux de développement et de croissance. Actuellement, selon les statistiques établies par l'OIT en 2018 pour les pays de la région arabe, les pays présentant les ratios emploi-population en âge de travailler les plus élevés sont le Qatar (87 %), les Émirats arabes unis (81 %), le Koweït (72 %), Bahreïn (72 %) et Oman (69 %), tandis que ceux qui affichent les ratios les plus faibles sont la Jordanie (33 %), le Yémen (34 %), l'Algérie (36 %), la Syrie (38 %) et l'Iraq (39 %). Ces statistiques, bien qu'elles soient généralement représentatives, ne fournissent pas une mesure fiable des niveaux d'alphabétisation et de la qualité de l'éducation. Par exemple, la Jordanie affiche actuellement un taux d'alphabétisation d'environ 98 %, mais son ratio emploi-population en âge de travailler n'est que de 33 %, ce qui peut s'expliquer par le fait que le nombre élevé de diplômés en ingénierie n'est pas accompagné d'une croissance proportionnelle dans les industries.

Même si la plupart des pays arabes sont dépourvus d'organismes tels que le Bureau du Vice-président chargé de l'urbanisation au Koweït à même de mener des études comme celles mentionnées ci-dessus, plusieurs États de la région évaluent actuellement cette lacune potentielle, par le biais d'organismes tels que la Jordan Education for Employment (JEFE), la Qatar Foundation for Education, Science and Community Development et la Public Education and Training Evaluation Commission of Saudi Arabia.

Encourager la culture des start-up durables

Le premier Séminaire régional sur les Objectifs de développement durable et l'égalité des sexes pour les Parlements du Moyen-Orient et d'Afrique du Nord, organisé conjointement par l'Union interparlementaire arabe et la Chambre des représentants de l'Égypte, s'est tenu à la Bibliothèque d'Alexandrie en septembre 2018, en présence des parlementaires de 15 pays différents. Les parlementaires présents ont demandé que des mesures soient prises à l'échelle régionale afin de lutter contre la hausse des taux de chômage, en particulier chez les femmes et les jeunes, due notamment au ralentissement récent de la croissance économique régionale de 6 % (2005-2010) et de 3,5 % (2011-2014).

L'ingénierie au service du développement durable

Pour contrer cette tendance, l'intervention des gouvernements sera indispensable. Ces derniers devront également étudier des possibilités de partenariats internes (start-up et PME) et externes (secteur privé et gouvernements étrangers) en vue de mettre en œuvre des solutions durables. À cet égard, les connaissances de base et l'éducation primaire constituent des leviers stratégiques, tandis que l'enseignement universitaire représente un tremplin vers la création de start-up et l'établissement de futurs partenariats internes.

La Jordanie affiche un taux d'alphabétisation exceptionnel : ce taux s'élevait en effet à 98 % en 2018 et le pays souhaite parvenir à l'alphabétisation universelle d'ici à 2020. Néanmoins, si l'enveloppe la plus importante du budget national est consacrée à l'éducation, les emplois à l'intention des diplômés font le plus souvent défaut et le ratio emploi-population en âge de travailler est très faible (33 %). La situation est similaire au Koweït, où 90 % des citoyens employés travaillent dans la fonction publique, tandis que 4 % seulement travaillent dans le secteur privé et 2 % dans des start-up. Pour les emplois autres que ceux relevant de la fonction publique, il convient de mettre en œuvre une approche multidimensionnelle afin de lutter contre le chômage ou le sous-emploi dans les États arabes où les taux d'emploi sont faibles (à l'instar de l'Algérie, des Comores, de l'Égypte, de l'Iraq, du Liban, de la Libye, du Maroc, de la Mauritanie, de la Somalie, du Soudan, de la Syrie, de la Tunisie et du Yémen).

Il est donc urgent de promouvoir activement la création de start-up dans la région, en élargissant les programmes d'enseignement ordinaires pour y inclure des cours et des formations sur l'entrepreneuriat, complétés par des programmes d'échanges professionnels afin de permettre aux étudiants stagiaires de se confronter aux défis du monde professionnel et d'y apporter des solutions. Cette action doit aller de pair avec l'élaboration de politiques nationales encourageant la création d'un plus grand nombre d'entreprises du secteur privé (en améliorant la « facilité de faire des affaires » dans la région), notamment en facilitant la création et la croissance des petites et moyennes entreprises au-delà des entreprises locales et en favorisant les possibilités d'investissement pour les entreprises internationales.

L'intégration des stages en tant que matière obligatoire dans les programmes d'enseignement technique et d'ingénierie impliquera la création d'un écosystème d'innovation et d'entrepreneuriat dans lequel les universités de la région arabe deviendront de véritables viviers d'entrepreneurs, favorisant et facilitant la création de start-up, l'innovation et le transfert technologique pour les diplômés et les entreprises. Cet écosystème fonctionnel offrira aux étudiants l'occasion d'allier leurs connaissances théoriques avec leur expérience pratique du monde professionnel. Cela leur permettra à la fois d'élargir leur expérience d'apprentissage et de mieux se préparer au monde du travail à la fin de leurs études, tout en leur permettant d'envisager la possibilité de créer leur propre entreprise.

Tous les éléments nécessaires à la maîtrise de la planification des activités au-delà de l'expertise technique devraient être inclus dans les programmes d'enseignement. Ainsi, les cours d'administration des affaires devraient intégrer l'enseignement des processus de planification et d'évolutions des affaires de bout en bout, y compris l'évaluation et la gestion des risques et des possibilités, ainsi que l'exposition aux particularités de l'entreprise et du gouvernement, comme les exigences relatives à la création et à la gestion d'une entreprise, les structures de soutien disponibles (politiques, financement, pépinières d'entreprise) aux premières étapes du développement des entreprises, la mise en échelle, le tutorat et autres.

Participation des femmes dans la pratique de l'ingénierie

L'égalité entre les sexes (ODD 5) et la bonne gouvernance (ODD 16) figuraient parmi les principaux thèmes abordés lors du premier Séminaire régional sur les ODD pour les États arabes. Les participants se sont engagés à « inclure une approche soucieuse de l'égalité des sexes dans tous leurs travaux visant à la réalisation des ODD ; à revoir les cadres juridiques pour éliminer les dispositions juridiques discriminatoires à l'égard des femmes ; et à utiliser leur pouvoir de contrôle pour demander des comptes aux gouvernements sur les stratégies et la planification relatives aux ODD. Cela contribuera à promouvoir une plus grande égalité entre les femmes et les hommes dans l'éducation, la formation et l'emploi, ainsi que dans le leadership économique et politique ».

Toutefois, malgré la hausse considérable des engagements et des politiques très médiatisées en faveur de l'égalité des sexes dans la région arabe ces dernières années, les écarts perdurent. Dans le Royaume d'Arabie saoudite, par exemple, la plupart des femmes ne peuvent étudier l'ingénierie qu'à l'étranger (en dehors des frontières du royaume), car la majeure partie des universités publiques et privées du royaume ne permettent pas aux femmes d'obtenir des diplômes d'ingénieur. Seules l'université d'Effat (en 2006) et celle du roi Abdulaziz (en 2013) permettent aux femmes d'obtenir des diplômes d'ingénieur de premier cycle. L'université des sciences et technologies du roi Abdullah (en 2009) n'accepte les femmes que pour les programmes d'ingénierie de troisième cycle. Par conséquent, la présence des femmes dans les entreprises qui traitent des sciences, de la technologie, de l'ingénierie et des mathématiques (STEM) au sein du Royaume demeure faible, voire inexistante. À l'heure actuelle, parmi les 4 846 entreprises proposant des services d'ingénieurs-conseils en Arabie saoudite, seules 54 (soit 1,11 %) sont détenues par des femmes.

Au Bahreïn, à l'issue de l'année scolaire 2018, les femmes représentaient 30 % des ingénieurs diplômés (221 femmes pour 522 hommes), ce qui est largement représentatif des moyennes mondiales. Cependant, ces chiffres ne correspondent en rien au pourcentage de femmes qui exercent la profession d'ingénieur. Au Maroc, le ratio femmes-hommes est de 3 pour 20 dans les

technologies de l'information, 3 pour 10 dans l'informatique et 4 pour 10 dans l'enseignement et les qualifications des ingénieurs. Cependant, dans son enquête sur la contribution de l'enseignement supérieur aux ODD et à l'exécution du mandat consistant à « ne laisser personne pour compte », l'UNESCO a indiqué : « l'on a récemment observé qu'au Maroc, plus de la moitié des étudiants dans les établissements de formation d'ingénieurs sont des filles ».

Au Koweït, les femmes sont encouragées à suivre des formations en ingénierie : ainsi, les femmes représentent en moyenne 80 % des diplômés en ingénierie. Pourtant, ce chiffre ne reflète pas non plus le rôle des STEM dans l'industrie du pays, dans la mesure où les femmes sont finalement peu nombreuses à exercer le métier d'ingénieur. Selon le centre de formation en ingénierie et d'anciens élèves de la faculté d'ingénierie et de pétrole (COEP) de l'Université du Koweït, un total de 4 872 ingénieurs a obtenu leur diplôme à l'issue de l'année scolaire 2017-2018. Parmi eux, on dénombre 3 901 diplômées en ingénierie (soit 80 % du nombre total de diplômés), mais la majorité d'entre elles occupe des postes non techniques dans leur milieu de travail.

À première vue, tout semble indiquer que les femmes se voient détournées de la carrière d'ingénieur simplement en raison de leur sexe. Toutefois, il est possible que plusieurs problèmes sous-jacents fassent obstacle à la correction de cette particularité culturelle. On citera, à titre d'exemple, le cas d'une grande entreprise de la région du Golfe qui a modifié la conception de ses combinaisons de sécurité (dont le port est obligatoire) en vue de les rendre culturellement acceptables pour les femmes. Cela a permis aux femmes d'envisager plus facilement de travailler en tant qu'ingénieurs et a contribué à l'amélioration de l'environnement de travail pour ces femmes. Grâce à cette initiative, le nombre de candidates souhaitant rejoindre cette entreprise a augmenté et de nombreuses communautés locales ont encouragé les femmes à travailler pour cette entreprise. À l'avenir, l'adoption d'approches novatrices pourrait permettre de tenir compte des particularités culturelles de la région, de créer de nouvelles possibilités pour les femmes dans le domaine des STEM et, par conséquent, de renverser la tendance.

Énergies alternatives dans les États arabes

Le sentiment d'urgence qui entoure la réalisation des ODD transparaissait lors de la cérémonie de signature du dispositif en faveur du climat et des ODD pour la région arabe, un événement tenu au Caire, en Égypte, le 16 mars 2019 et organisé par Dr Ahmed Abu El Geit, Secrétaire général de la Ligue des États arabes, et Dr Mahmoud Abu Zeid, Président du Conseil arabe de l'eau. Alors qu'il ne reste plus que dix années pour atteindre les cibles qui sous-tendent les ODD du Programme de développement durable à l'horizon 2030, les dirigeants présents à cet événement ont réaffirmé la nécessité de faire preuve de davantage d'ambition en vue d'aider les pays à accélérer les résultats et à produire des avantages communs aux

différents ODD. Les cibles visant à faciliter l'utilisation de sources d'énergie alternatives au lieu de combustibles à forte émission de carbone (tels que les combustibles fossiles) aideront à atteindre à la fois l'Objectif 13 relatif aux changements climatiques et l'Objectif 7 consacré à l'énergie propre et d'un coût abordable, et permettront de réaliser d'autres ODD, notamment ceux relatifs à l'élimination de la pauvreté, la faim « zéro », et l'accès à l'eau propre et à l'assainissement.

L'événement décrit ci-dessus compte parmi les nombreux événements organisés par les gouvernements de la région du Golfe en vue de démontrer leur engagement à accélérer la pénétration et l'utilisation des énergies alternatives. La plupart des pays de la région ont pris des décisions et se sont fixé des objectifs futurs en vue d'atteindre des objectifs spécifiques de pénétration d'énergies alternatives dans leur production d'énergie au cours des prochaines années. Les tableaux ci-dessous présentent une vue d'ensemble établie à partir des données de l'Union arabe de l'électricité concernant la pénétration des énergies alternatives en 2013 et 2016 respectivement (Union arabe de l'électricité, 2015, 2017). On y observe un développement progressif ainsi que la nécessité de redoubler d'efforts dans tous les domaines pour atteindre les objectifs fixés par les pays d'autres régions.

Au Koweït, par exemple, l'Émir s'est engagé, lors d'une conférence des Nations Unies sur les changements climatiques, à produire 15 % de son électricité à partir de sources d'énergie alternatives d'ici à 2030. Les dirigeants de Dubaï ont pris un engagement similaire en déclarant que, d'ici à 2020, la ville produira 7 % de sa consommation d'électricité à partir d'énergies alternatives, 25 % d'ici à 2030 et 75 % d'ici à 2050, comme le souligne le lancement officiel du programme Fully Charged Sustainable City. En Arabie saoudite, le projet Vision 2030 prévoit l'ajout de 9,5 GW de production d'électricité à partir d'énergies alternatives, après l'augmentation de 16 MW (27,79 %), de 58,462 MW à 74,709 MW, réalisée entre 2013 et 2016. De même, la Jordanie a augmenté sa part d'électricité produite à partir d'énergies alternatives de 3,333 MW à 4,626 MW (soit une augmentation de 38,79 %) entre 2013 et 2016.

Recommandations

1. Publication par les gouvernements d'études utilisant des données pour prévoir l'évolution du marché du travail, et examiner les tendances passées, l'orientation stratégique et les aspirations de croissance pour orienter les choix des étudiants vers des domaines d'études spécifiques.
2. Inclusion par les universités de cours qui contribuent à changer les mentalités des jeunes générations, en réduisant leur dépendance à l'égard des emplois disponibles et en leur permettant de créer des opportunités professionnelles pour les autres.

Références

- Banque mondiale. 2019. *Rapport sur le développement dans le monde en 2019 : le travail en mutation*. Washington, DC, Banque internationale pour la reconstruction et le développement/Banque mondiale. <https://www.banquemondiale.org/fr/publication/wdr2019>
- Khorshid, E. et Alaiwy, M.H. 2016. Education for employment: A career guidance system based on labour market information. Dans : *Compte-rendu d'INTED2016*, 10^e conférence internationale sur la technologie, l'éducation et le développement, 7-9 mars à Valence, Espagne. <https://library.iated.org/view/KHORSHID2016EDU>
- OIT. 2018. Employment-to-population ratio. Organisation internationale du Travail. www.ilo.org/ilostat-files/Documents/description_EPR_EN.pdf
- Union arabe de l'électricité. 2015. Statistical bulletin in the Arab countries 2014, Issue 23. www.auptde.org/Publications.aspx?lang=en&CID=36 (en arabe.)
- Union arabe de l'électricité. 2017. Statistical bulletin 2016, Issue 25. www.auptde.org/Publications.aspx?lang=en&CID=36 (en arabe).

Acronymes

| | | | |
|-----------------|---|----------------|--|
| ALC | Amérique latine et Caraïbes | IEA | International Education Alliance (Alliance internationale pour l'éducation) |
| APP | Apprentissage par problème et par projet | IEM | Institute of Engineers of Malaysia (Institut d'ingénieurs de Malaisie) |
| ASEE | American Society for Engineering Education (Association américaine d'enseignement de l'ingénierie) | IFEES | International Federation of Engineering Education Societies (Fédération internationale des sociétés de formation d'ingénieurs) |
| BasD | Banque asiatique de développement | ILOSTAT | Base de données de l'Organisation internationale du Travail |
| CACEE | Association chinoise pour la formation continue des ingénieurs | ISTIC | Centre international pour la coopération Sud-Sud dans le domaine des sciences, de la technologie et de l'innovation |
| CAE | Académie chinoise d'ingénierie | NFIF | Non formel et informel |
| CEDEFOP | Centre européen pour le développement de la formation professionnelle | OCDE | Organisation de coopération et de développement économiques |
| CNUCCC | Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques | OCHA | Bureau des Nations Unies pour la coordination des affaires humanitaires |
| CNUCED | Conférence des Nations Unies sur le commerce et le développement | ODD | Objectifs de développement durable |
| COP | Conférence des Parties | OMS | Organisation mondiale de la santé |
| COVID-19 | Maladie à coronavirus 2019 | ONU | Organisation des Nations Unies |
| CRIDA | Analyse des risques climatiques en vue d'une décision éclairée | ONUDI | Organisation des Nations Unies pour le développement industriel |
| CSI | Améliorer les services climatiques pour l'investissement dans les infrastructures | PDC | Programme de développement des compétences |
| DESA | Département des affaires économiques et sociales | PDP | Plan de développement personnel |
| DHI | Décennie hydrologique internationale | PHI | Programme hydrologique intergouvernemental |
| DPC | Développement professionnel continu | PIB | Produit intérieur brut |
| DPO | Data protection officer (Délégué à la protection des données) | PISA | Programme international pour le suivi des acquis des élèves |
| ECEC | Conseil européen des chambres d'ingénieurs | PME | Petites et moyennes entreprises |
| EEE | Espace économique européen | PNA | Plan national d'adaptation |
| EPI | Équipement de protection individuelle | PNUD | Programme des Nations Unies pour le développement |
| ETF | Fondation européenne pour la formation | PPP | Partenariats public-privé |
| EUCEN | European University Continuing Education Network (Réseau européen de formation continue universitaire) | RAEng | Académie royale d'ingénierie |
| FAOI | Fédération des organisations d'ingénieurs en Afrique | RGPD | Règlement général sur la protection des données |
| FCI | Formation continue des ingénieurs | SCPI | Système de certification des professionnels de l'ingénierie |
| FEANI | Fédération européenne d'associations nationales d'ingénieurs | STEM | Sciences, technologie, ingénierie et mathématiques |
| FIDIC | Fédération internationale des ingénieurs-conseils | TIC | Technologies de l'information et de la communication |
| FMOI | Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs | UIL | Institut de l'UNESCO pour l'apprentissage tout au long de la vie |
| GCRF | Global Challenges Research Fund (Fonds de recherche sur les défis mondiaux) | UIT | Union internationale des télécommunications |
| GEDC | Conseil mondial des doyens des sciences de l'ingénieur | UNESCO | Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture |
| GIZ | Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (Agence allemande de coopération internationale) | UN-GGIM | Initiative des Nations Unies sur la gestion de l'information géospatiale à l'échelle mondiale |
| IA | Intelligence artificielle | UNICEF | Fonds des Nations Unies pour l'enfance |
| IACEE | International Association for Continuing Engineering Education (Association internationale pour la formation continue des ingénieurs) | WASH | Eau, assainissement et hygiène |
| ICEE | Centre international pour l'enseignement de l'ingénierie | WCCE | Conseil mondial des ingénieurs civils |

L'ingénierie au service du développement durable

Réaliser les Objectifs de développement durable

Pour réaliser le Programme de développement durable à l'horizon 2030 et atteindre les 17 objectifs de développement durable, les sociétés interconnectées doivent aujourd'hui trouver de nouvelles approches holistiques et interdisciplinaires pour relever les défis du développement durable, en s'appuyant sur l'ensemble des connaissances et des disciplines scientifiques. Toutefois, pour jouer pleinement leur rôle dans le contexte actuel de mondialisation, les pays doivent disposer des capacités scientifiques, technologiques et d'ingénierie nécessaires pour apporter des solutions durables dans des domaines tels que la santé, l'agriculture, l'éducation, la communication et le développement industriel. C'est pourquoi l'ingénierie est un levier important du développement socio-économique durable et que la profession d'ingénieur est essentielle pour répondre aux besoins humains fondamentaux, réduire la pauvreté, promouvoir un développement sûr et durable, faire face aux situations

d'urgence, reconstruire les infrastructures, combler le manque de connaissances et promouvoir la coopération interculturelle. À cet égard, l'Initiative de l'UNESCO en matière d'ingénierie continuera à renforcer ses activités dans ce domaine en promouvant l'enseignement de l'ingénierie aux niveaux secondaire et supérieur ; elle mettra également l'accent sur les rôles et les réalisations des femmes et des jeunes dans ce secteur, afin que « personne ne soit laissé pour compte ».

Dix ans après la publication du premier rapport sur l'ingénierie, la pandémie de COVID-19 continue de se propager dans le monde et a révélé les multiples facettes de la contribution de l'ingénierie, tant dans la conception de l'impression 3D que dans celle des masques faciaux, des appareils respiratoires ou des systèmes de suivi novateurs. Ce deuxième rapport sur l'ingénierie donne un aperçu du travail des ingénieurs responsables du respect des engagements et des défis en matière de développement durable. Le rapport présente les principales recherches,

innovations et visions du monde entier quant à l'avenir de la profession d'ingénieur à l'aube de la Quatrième révolution industrielle. L'UNESCO, par son mandat unique dans le domaine des sciences, joue un rôle crucial en aidant ses États membres à faire progresser la science de l'ingénieur et à créer des sociétés de la connaissance capables de choisir l'avenir que nous voulons pour la planète et ses habitants.

C'est dans cette optique que le présent rapport se veut un point de référence pour les gouvernements, les organisations d'ingénieurs, les établissements d'enseignement et l'industrie en vue de favoriser les échanges et l'excellence scientifiques, d'encourager les investissements dans la recherche appliquée et la formation en ingénierie et de promouvoir et catalyser la collaboration et les réseaux scientifiques internationaux dans l'intérêt du développement durable et d'un avenir inclusif, équitable et résilient, permettant de relever les défis de notre monde en rapide évolution.