LES TENDANCES GÉNÉRALES EN FORMATION MINIÈRE

12 septembre 2019 → 30 janvier 2020

Rapport semestriel tiré de l'infolettre MineAvenir

Institut national des mines Québec

Recherche, analyse et rédaction
Alexandre Nana, conseiller à l'innovation et à la recherche
Institut national des mines

Supervision
Jean-François Pressé, président-directeur général
Institut national des mines

Diffusion
Karine Lacroix, conseillère en communication
Institut national des mines

Réalisation de la veille informationnelle et l'infolettre MineAvenir
Karine Lacroix, conseillère en communication
Maripier Viger, adjointe aux communications
Noémie Bérubé, adjointe aux communications
Institut national des mines

Révision linguistique
Gilles Bordage

Graphisme
Andrew Morrow

Mise en page
Maripier Viger, adjointe aux communications
Institut national des mines

Le présent ouvrage a été produit par l'Institut national des mines.

Pour toute demande de renseignement :
Institut national des mines
125, rue Self
Val-d'Or (Québec) J9P 3N2

Téléphone : 819 825-4667
Télécopieur : 819 825-4660
Info@inmq.qc.ca

Dépôt légal – 2e trimestre 2020
Bibliothèque et Archives nationales du Québec
ISBN 978-2-550-86238-3 (imprimé)
ISBN 978-2-550-86237-6 (PDF)

Bibliothèque et Archives Canada
ISSN 2563-1322 (imprimé)
ISSN 2563-1330 (en ligne)

© Institut national des mines,
Gouvernement du Québec (2020)

Avant-propos

Un des objectifs de la planification stratégique 2018-2023 de l'Institut national des mines (INMQ) est de documenter les tendances innovantes en formation minière à l'échelle mondiale. La présente publication se compose d'articles tirés de la veille informationnelle hebdomadaire de l'Institut. Deux publications des tendances sont produites chaque année. Ces publications sont des outils utiles à la prise de décision non seulement pour orienter les recherches effectuées à l'INMQ, mais également pour les entreprises minières et les établissements d'enseignement.

L'INMQ est conscient que certains sujets ou articles ont pu échapper à son attention et que le présent document ne constitue pas un recensement exhaustif, mais bien une veille sélective. L'INMQ tient également à rappeler qu'une tendance se définit comme étant un courant d'opinion au sein d'un groupe, d'un organisme ou d'une collectivité et que, par conséquent, cette publication n'est pas une vérité absolue, mais bien une présentation de tendances.

Table des matières

Avant-propos	1
Table des matières	2
Liste des tableaux	3
Liste des figures	4
Résumé	5
Introduction	6
1. Les tendances en formation dans le secteur minier	7
1.1. L'acquisition des compétences essentielles à l'ère du numérique	9
1.2. Les investissements et les partenariats financiers	17
1.3. Les nouveaux programmes et modes d'enseignement	20
1.4. Les autochtones et les femmes dans le secteur minier	23
2. Les tendances technologiques de l'industrie minière	25
2.1. Une place plus importante pour les données	27
2.2. La connectivité dans les mines et les équipements intelligents	27
2.3 Les technologies immersives et de simulation	29
2.4. Les robots et les drones	29
2.5. Le leadership québécois dans le secteur des mines	30
Conclusion	31
Références	32

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les tendances générales en formation dans le secteur minier	8
Tableau 2 : Les initiatives en formation émergeant de l'infolettre MineAvenir	11
Tableau 3 : Les investissements financiers recensés dans l'infolettre MineAvenir	18
Tableau 4 : Les tendances générales en technologie dans le secteur minier	26

Liste des figures

Figure 1 : Principales tendances en formation dans le secteur minier et nombre d'articles du MineAvenir abordant chaque thème	5
Figure 2 : Principales technologies adoptées par les mines et nombre d'articles du MineAvenir abordant chaque technologie	5
Figure 3 : Répartition du nombre total d'articles de l'infolettre MineAvenir de septembre 2019 à janvier 2020 en fonction du thème principal de chaque article	5
Figure 4 : Technologies de simulation (photo tirée de International Mining, 2019)	14
Figure 5 : Première qualification d'automatisation en Australie (photo tirée de Australian Mining, 2019h)	19
Figure 6 : Le cyberapprentissage (e-learning) (photo tirée de Chantalle Henriques, 2019)	21
Figure 7 : Réalité virtuelle multisensorielle (photo tirée de Australasian Mine Safety, 2019a)	22
Figure 8 : Tablette robuste Toughbook de Panasonic (photo tirée de Australian Mining, 2019e)	28
Figure 9 : Camion autonome Scania AXL (photo tirée de Australian Mining, 2019i)	28
Figure 10 : Illustration d'une plateforme Honeywell (tirée de Australian Mining - Safe to Work, 2019)	29
Figure 11 : MRC Rail Runner de SafeSight (photo tirée de TimminsToday.com, 2019)	29
Figure 12 : Illustration de l'utilisation du drone dans la mine souterraine Hoyle Pond (tirée de CIM MAGAZINE, 2019)	30

Résumé

Le présent ouvrage présente les tendances générales en formation et en technologies dans le secteur des mines. Il est réalisé à partir des articles de la veille informationnelle mondiale effectuée par l'Institut national des mines du Québec (INMQ) à travers son infolettre MineAvenir pour la période du 12 septembre 2019 au 30 janvier 2020. Ce recueil révèle entre autres que le développement des compétences numériques, particulièrement celles de la main-d'œuvre la plus vulnérable à la transformation numérique amorcée par les entreprises minières, est une préoccupation mondiale. En effet, comme le montre la **figure 1**, l'acquisition des compétences du 21e siècle par la main-d'œuvre minière est le sujet prédominant qui a orienté bon nombre d'investissements financiers.

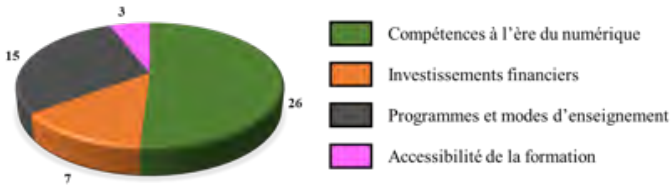

Figure 1 : Principales tendances en formation dans le secteur minier et nombre d'articles du MineAvenir abordant chaque thème

Ce document montre également que les entreprises minières continuent de s'approprier les nouvelles technologies et de les intégrer graduellement dans leurs activités. C'est ainsi que les données ont pris une place prépondérante et que les véhicules autonomes, les drones et les robots ont particulièrement été adoptés, permettant notamment l'essor d'opérations minières plus sécuritaires et plus agiles (**figure 2**).

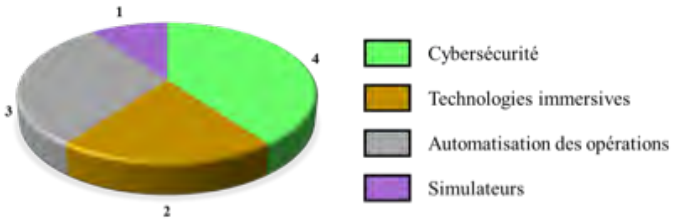

Figure 2 : Principales technologies adoptées par les mines et nombre d'articles du MineAvenir abordant chaque technologie

D'un point de vue quantitatif, il est difficile de passer sous silence le fait que, sur les 48 articles publiés dans la veille informationnelle MineAvenir faisant l'objet du présent ouvrage, la tendance principale qui se dessine en filigrane est celle de la formation, qu'elle soit initiale ou continue et qu'elle prenne forme en entreprise ou dans les établissements d'enseignement (**figure 3**). Cela met en relief la préoccupation majeure du secteur minier à l'ère des changements transformationnels déclenchés par la perturbante 4e révolution industrielle : **la formation, autrement dit la requalification, le perfectionnement ou encore la mise à niveau des compétences du personnel minier.**

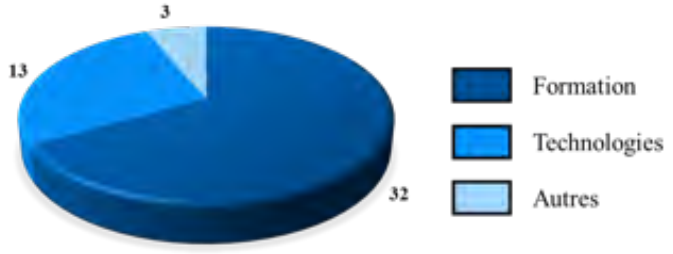

Figure 3 : Répartition du nombre total d'articles de l'infolettre MineAvenir de septembre 2019 à janvier 2020 en fonction du thème principal de chaque article

Cette dernière préoccupation cadre parfaitement avec la mission de l'Institut national des mines qui est de conseiller le gouvernement du Québec dans la mise en œuvre d'une offre de formation de pointe. À travers ce document, l'Institut entend appuyer les établissements d'enseignement et les entreprises minières en contribuant au développement du plein potentiel du secteur minier québécois.

Introduction

La 4e révolution industrielle survenue au cours des dernières années continue d'avoir un impact significatif dans l'industrie minière à l'échelle mondiale. L'industrie minière, au même titre que les autres secteurs industriels, change progressivement ses méthodes de travail sous l'impulsion du développement rapide et de l'intégration des nouvelles technologies dans ses opérations. Cela requiert une main-d'œuvre polyvalente et suffisamment qualifiée, c'est-à-dire une main-d'œuvre dotée de compétences lui permettant de s'arrimer aux changements inéluctables qui se produisent dans des mines de plus en plus intelligentes. Dans un contexte de pénurie de main-d'œuvre (Hélène Bégin, 2019), l'adéquation entre les compétences des personnes apprenantes et les besoins de l'industrie revêt un intérêt particulier. C'est la raison pour laquelle des investissements et des partenariats entre les établissements d'enseignement, les entreprises et les gouvernements ont été développés, et que de multiples actions telles que la création de nouveaux programmes de formation et la diversification des modes d'enseignement ont été entreprises, et ce, dans le dessein de doter le personnel minier de connaissances et de compétences nécessaires pour évoluer dans un environnement 4.0.

Dans la présente publication, l'Institut national des mines du Québec (INMQ) présente les tendances émergentes tirées de sa veille informationnelle. Le document se divise en deux grandes parties : une première qui se concentrera sur les tendances en formation dans le secteur des mines et une seconde consacrée aux technologies adoptées par l'industrie minière. Cet ouvrage a été conçu à partir des articles publiés dans l'infolettre *MineAvenir* entre septembre 2019 et janvier 2020. Une fois de plus, rappelons qu'il ne s'agit pas ici d'une vérité absolue, mais bien d'une présentation des tendances qui orienteront les travaux de l'Institut.

Les tendances générales en formation minière

1

LES TENDANCES EN FORMATION DANS LE SECTEUR MINIER

Les principaux thèmes qui ressortent des différents articles relatifs à la formation publiés dans l'infolettre *MineAvenir* de l'Institut national des mines entre le 12 septembre 2019 et le 31 janvier 2020 sont regroupés dans le **tableau 1**.

Tableau 1 : Les tendances générales en formation dans le secteur minier

TENDANCES GÉNÉRALES EN FORMATION MINIÈRE	Nombre d'articles abordant le sujet
COMPÉTENCES DU 21E SIÈCLE	
Compétences nécessaires à l'ère du numérique / Formation *Cybersécurité, intelligence artificielle, simulation, robotique, réalité virtuelle et augmentée, programmation, données, logiciels, habiletés interpersonnelles, manuelles et avec les outils numériques, initiatives (projets de recherche, plateformes numériques, centres d'expertise, de formation ou d'innovation), etc.*	**26**
Formation continue de la main-d'œuvre *Requalifier la main-d'œuvre, le milieu de travail comme lieu d'apprentissage, l'évaluation en entreprise ou en stage, etc.*	10
Compétences en santé et sécurité à l'ère de la 4e révolution industrielle	5
INVESTISSEMENTS ET PARTENARIATS	
Investissements financiers en formation par les gouvernements et les établissements d'enseignement	**7**
Investissement financier en formation par des entreprises privées	3
NOUVEAUX PROGRAMMES ET MODES D'ENSEIGNEMENT	
Repenser les programmes de formation *Intégration des TIC, classe inversée, apprentissage numérique, apprentissage par compétences, outils basés sur l'IA, science des données, etc.*	**16**
Diversifier les modes d'enseignement *Repenser le rôle de l'enseignement grâce à l'IA, les solutions innovantes en formation et enseignement, apprentissage à distance, en alternance, mixte (en ligne et en classe), etc.*	7
Technologies immersives (virtuelle, augmentée ou mixte) et simulateurs	3
ACCESSIBILITÉ À LA FORMATION	
La formation en région et les minorités dans le secteur minier	**4**
Favoriser le partage de connaissances et de pratiques	1

Les tendances générales en formation minière

Après un tel regroupement, il est possible de conjecturer une tendance à partir de certains thèmes analogues ou qui reviennent à plusieurs reprises. Ainsi, les grandes tendances en formation qui seront abordées de manière plus exhaustive dans cette première partie concernent les compétences essentielles à l'ère du numérique et les investissements majeurs qui se sont faits non seulement au Québec, mais également à travers le monde, relativement, par exemple, à la création de centres de recherche, d'expertise et de formation, de plateformes numériques et de travail collaboratif, ainsi qu'à des projets de recherche et d'innovation. À ces tendances s'ajoutent celles liées aux nouveaux programmes de formation et à la diversification des modes d'enseignement à travers l'utilisation des outils technologiques émergents en pédagogie.

1.1. L'acquisition des compétences essentielles à l'ère du numérique

Selon le *Global Leadership Report du Mining Journal,* au Canada, plus de la moitié de la main-d'œuvre du secteur minier est âgée de 45 ans ou plus, plus de 60 000 employés des mines canadiennes prendront leur retraite dans l'année 2020 et, d'ici 2023, l'industrie minière aura besoin de 145 000 nouveaux travailleurs, ce qui représente plus de la moitié de la main-d'œuvre minière du pays (Gouvernement de l'Ontario, 2020; Hélène Bégin, 2019; Mining Journal, 2019). Cela est d'autant plus critique que, selon le même journal, attirer des élèves dans les programmes de formation menant vers le secteur minier et les doter de compétences essentielles pour l'industrie du futur deviendront cruciaux à mesure que les progrès technologiques, l'automatisation et l'intelligence artificielle seront adoptés par les mines (Mining Journal, 2019). En effet, sous l'impulsion de diverses technologies et innovations, l'industrie minière continue son virage 4.0. Cette transformation numérique inclut entre autres l'intégration et l'utilisation adéquates des technologies révolutionnaires pour créer des centres de commande à distance, procéder à une gestion intégrée des opérations, à l'analyse de données, à l'utilisation des drones, des puissants logiciels de planification minière, améliorer la connectivité dans les mines et automatiser les systèmes, les équipements et les véhicules. Cela soulève un ensemble d'obstacles dont l'un des principaux serait le manque de personnel adéquatement compétent, selon ce que rapportent plusieurs enquêtes (Brian McKenna, 2019; INMQ, 2019; PwC, 2020).

La migration technologique des mines engendre d'importants changements dans les habitudes de travail en raison de la mutation des processus, des systèmes et des exigences opérationnelles. Ceux-ci devraient être identifiés et gérés avec soin, puisqu'ils pourraient provoquer la relocalisation du personnel et de certaines activités de la mine, mais surtout nécessiter la requalification ou le perfectionnement des compétences actuelles ou l'acquisition de nouvelles compétences par la main-d'œuvre minière (Carly Leonida, 2019; Global Mining Guidelines Group (GMG), 2019; World Economic Forum, 2019). Le même son de cloche résonne chez McKinsey & Company et chez TechWire. Les premiers relèvent que la cybersécurité est le pilier de la transition numérique des entreprises et que, à cet égard, elle nécessite la collaboration entre les équipes multidisciplinaires et un personnel ayant des compétences numériques ou, en anglais, *e-shaped skills* (James Kaplan, Wolf Richter et David Ware, 2019). TechWire, pour sa part, mentionne que, considérant les investissements importants en nouvelles technologies qui se feront au cours des prochaines années par les entreprises minières, « *l'intégration de nouvelles technologies dans l'industrie nécessitera une formation pour s'assurer que la technologie est acceptée et adoptée. Il s'agit d'une priorité de gestion continue*[1] » (Techwire Asia, 2019). « Nous devons engager des démarches d'apprentissage en continu, en situation de travail, sur des plateformes digitales avec des modalités innovantes (réalité augmentée, mobile learning, etc.) dans des formats plus courts, au plus près des

[1] Traduction libre.

besoins de chacun, en réduisant au maximum le temps entre l'apprentissage et la mise en pratique des compétences développées », renchérissait dernièrement Mme Brigitte Sabotier, directrice des ressources humaines d'Orange France. Cet état de fait montre que l'évolution des compétences de la main-d'œuvre à travers la formation est un incontournable dans le processus de transformation numérique des entreprises. D'ailleurs, la qualité de la formation fera l'objet d'une conférence en Australie en mai 2020 sur l'amélioration de la qualification et de la formation minière pour s'assurer d'avoir des opérations minières plus sécuritaires (Australasian Mine Safety Journal, 2019b).

En outre, diverses initiatives de gouvernements, d'établissements d'enseignement et d'entreprises ont vu le jour avec pour dessein de remédier à la pénurie des compétences essentielles dans cette ère technologique, de réduire l'écart entre les compétences nécessaires à la main-d'œuvre minière et les besoins des entreprises minières qui ont amorcé leur virage technologique, et de former la future génération de personnes apprenantes pour qu'elle soit en mesure de faire face à la pléthore de défis soulevés par la 4e révolution industrielle. Cette future génération devra fortement être interdisciplinaire, en s'appuyant sur une pensée numérique et critique qui transcende les frontières des disciplines traditionnelles de l'exploitation minière (Deanna (Lazzaroni) Pate, 2020; Mining Journal, 2019).

Le **tableau 2** présente les actions en lien avec le développement des connaissances et des compétences nécessaires à l'intégration, à l'appropriation et à l'utilisation adéquate des nouvelles technologies révolutionnaires et innovatrices. Quelques constats se dégagent de ce tableau. Tout d'abord, il est intéressant de constater que le vent de la 4e révolution industrielle a soufflé (et continue de souffler) d'un continent à l'autre, en passant principalement dans les pays où l'activité minière est importante (Australian Mining, 2019h, 2019b; Daniel Gleeson, 2019; Institut québécois d'intelligence artificielle (MILA), 2019; jeuneafrique.com, 2019; Journal Le Monde, 2020; Le Monde Informatique, 2019; Penn State University, 2019; safran-group.com, 2019; Université d'Ottawa, 2019).

Tableau 2 : Les initiatives en formation émergeant de l'infolettre MineAvenir

Pays	Organismes créateurs	Type d'organisme créé	Objectifs
Afrique du Sud	Murray & Roberts Cementation et Mining Qualifications Authority (entreprise, gouvernement)	*Centre de formation Murray & Roberts*	Former la main-d'oeuvre minière en utilisant les nouvelles technologies
Australie	Byrnecut Australia et Immersive Technologies (entreprises)	*Centre de formation et d'intégration en entreprise*	*Offrir une formation en ligne, en classe et sur simulateur*
	Rio Tinto, BlueChilli, Amazon Web Services et Université de Sydney (entreprises, établissement)	*Centre pour l'automatisation des mines*	*Accélérer le développement des compétences numériques et préparer les jeunes Australiens au travail de l'avenir*
	Accenture (entreprise)	*Centre d'innovation minière*	*Mettre ensemble les concepteurs et les fournisseurs de technologies avec les entreprises minières pour accroître leur appropriation de la technologie numérique*
	Ministre fédéral de l'Éducation (gouvernement)	*Six nouveaux centres de formation de l'Australian Research Council*	*Renforcer la collaboration en matière de recherche entre les universités et le secteur privé*
	Immersive Technologies (entreprise)	*Centres d'expérience de l'industrie minière*	*Offrir une compréhension des dernières technologies au personnel professionnel de l'industrie minière*
Canada	*Ministère fédéral Innovation, Sciences et Développement économique et ministère des Relations internationales et de la Francophonie (gouvernements)*	*Centre d'expertise international pour l'avancement de l'intelligence artificielle*	*Analyser les mesures qui visent à renforcer la capacité nationale à commercialiser et à adopter les technologies liées à l'intelligence artificielle (IA)*
	IBM Canada, CRSNG et Université de Sherbrooke (entreprises, gouvernement, établissement)	*Renouvellement de la Chaire de recherche industrielle CRSNG-IBM Canada*	*Développer de nouvelles approches de fabrication industrielle robuste et de nouveaux matériaux qui augmentent la résistance et la fiabilité des composants électroniques tout en formant du personnel hautement qualifié*
	IBM Canada et Université d'Ottawa (entreprise, établissement)	*Pôle technologique en cybersécurité*	Répondre aux besoins essentiels du gouvernement, du secteur public et du secteur privé en matière de cybersécurité

Pays	Organismes créateurs	Type d'organisme créé	Objectifs
	Gouvernement de l'Ontario[2] (gouvernement)	*Programme nouvellement agréé de formation par l'apprentissage*	Combler l'écart entre les compétences existantes et requises pour les métiers spécialisés (instrumentation et contrôle, chaudronnerie, électricité, etc.) et lutter contre la pénurie de main-d'œuvre dans ces domaines
	Université Laval et ministère de l'Économie et de l'Innovation du Québec[2] (établissement, gouvernement)	*Institut intelligence et données (IID) et mise en place du Pôle d'expertise régionale en IA piloté par l'IID*	Former une main-d'œuvre qualifiée en IA, accompagner les entreprises et organismes souhaitant intégrer l'IA dans leurs activités, fédérer et soutenir l'expertise et l'innovation en IA et en science des données
	IRME UQAT-Polytechnique et 6 entreprises minières (entreprises, établissements)	*Renouvellement du programme de recherche en environnement minier*	Former les experts de demain dans le domaine des mines et de l'environnement
États-Unis	Honeywell (entreprise)	*Plateforme combinant à la fois la réalité virtuelle et augmentée*	Offrir la virtualisation d'un actif et l'utiliser pendant sa durée de vie
	University Park-Pennsylvanie (établissement)	*Centre pour les expériences immersives*	Répondre aux besoins de la société et des entreprises
	National Institute for Occupational Safety and Health et University of Nevada (gouvernement, établissement)	*Projets interdisciplinaires de recherche et de formation*	Doter la main-d'œuvre minière de compétences relatives aux technologies émergentes comme l'intelligence artificielle, les drones et les mégadonnées pour des opérations minières plus sûres et plus saines
France	Mines ParisTech (établissement)	*Plateforme numérique interdisciplinaire*	Coupler la simulation numérique et l'intelligence artificielle pour l'industrie du futur
	IoT Valley (entreprise)	*Programme d'incubation interécoles*	Aider de futurs entrepreneurs à constituer leur équipe pour démarrer une entreprise à vocation technologique
	Mines ParisTech[2] (établissement)	*Chaire BIGMEGA*	Développer des méthodes innovantes en mécanique avancée des matériaux de structure par apprentissage machine
Sénégal	Réseau français VIVADATA et privé (entreprises)	*École de formation: Dakar Institute of Technology*	École destinée à la programmation et en intelligence artificielle

[2] Article non inclus dans l'infolettre *MineAvenir* de septembre 2019 à janvier 2020.

Les tendances générales en formation minière

Ensuite, il apparaît que des organismes de nature différente sont à l'origine de ces initiatives. Il est possible de mentionner des entreprises minières, celles spécialisées dans les nouvelles technologies, les gouvernements, les organismes gouvernementaux ou d'accréditation de la formation et les établissements d'enseignement. Enfin, les organismes créés dans le but de soutenir ces initiatives ont des profils divers avec des objectifs variés. Il est question de centres de recherche ou de formation, de centres d'expertise technologique, d'innovation et d'expérience pour l'industrie minière, de plateformes numériques, de projets et de chaires de recherche et même d'une école de formation en lien avec les nouvelles technologies.

C'est dans cet ordre d'idées qu'en Afrique du Sud, le centre de formation Murray & Roberts Training Academy (MRTA) a amélioré et agrandi ses installations près de Carletonville à Gauteng. Son but est de doter les jeunes sans-emploi des collectivités voisines des exploitations de l'entreprise minière de compétences nécessaires pour combler les besoins en main-d'œuvre pour les projets miniers souterrains de Murray & Roberts Cementation à travers le pays (Daniel Gleeson, 2019). En procédant de la sorte, on a transformé la formation en emplois, mettant ainsi en lumière le fait que la formation est un palliatif pour la pénurie de main-d'œuvre, comme l'avait déjà compris le gouvernement de l'Ontario qui vient d'investir dans six programmes de formation pour éviter le manque de main-d'œuvre dans les métiers spécialisés, comme l'instrumentation et le contrôle, la chaudronnerie et l'électricité (Gouvernement de l'Ontario, 2020). Également en Afrique, une nouvelle école consacrée à l'intelligence artificielle a été créée à Dakar au Sénégal. Les étudiants inscrits dans cette nouvelle école auront une formation dans des thèmes liés à l'intelligence artificielle qui est l'un des incontournables de la transformation numérique des entreprises (jeuneafrique.com, 2019). La programmation, l'analyse, la collecte et le stockage des données, l'apprentissage automatique (*machine learning*), le traitement automatisé du langage (*Natural Langage Processing* – NLP) et les réseaux de neurones profonds (*Deep Learning*) sont les principaux sujets de formation qui seront abordés dans cette école.

En Australie, du côté des entreprises minières, la mine Byrnecut et l'entreprise spécialisée dans les technologies immersives Immersive Technologies se sont associées pour créer un centre de formation technique et d'intégration pour perfectionner les compétences numériques de leurs employées et employés, et les aider à développer les meilleures pratiques minières dans un environnement axé sur la technologie (Australian Mining, 2019c). De même, l'entreprise minière Rio Tinto compte combler le manque de compétences numériques imminent dans la future main-d'œuvre du pays à travers la création du centre Rio Tinto d'automatisation des opérations minières qui permettra notamment aux personnes apprenantes de développer leurs compétences pour travailler dans les centres de contrôle à distance des opérations de la compagnie (Australian Mining, 2019g). En partenariat avec le gouvernement de l'Australie-Occidentale et l'Université de Sydney, l'entreprise veut, de cette façon, préparer les jeunes Australiens et Australiennes au travail de l'avenir, **inculquer une culture numérique de base** aux travailleuses et aux travailleurs du secteur minier, tout en luttant contre la pénurie de compétences en sciences, technologies, ingénierie et mathématiques (STIM) qui sévit dans le pays et qui pourrait devenir critique dans les années à venir, comme le mentionne la firme d'analyse du marché de l'emploi Burning Glass Technologies (Burning Glass Technologies, 2018). Ces compétences sont indispensables à la révolution numérique dans toute entreprise, y compris celles du secteur minier. M. Pierre Fitzgibbon, ministre de l'Économie et de l'Innovation du Québec, abondait dans ce sens lorsqu'il disait en mars 2019 que « le rôle du gouvernement est de cultiver une culture numérique et de permettre aux PME de trouver un moyen rapide et collaboratif d'entamer leur transformation numérique[3] » (The Future Economy, 2019). C'est à ce même diapason que semble vibrer le Royaume-Uni, alors qu'une recherche effectuée par la société de logiciels Alteryx auprès de plus de 3 000 répondants a mis en lumière le fait que

[3] Traduction libre.

la transformation numérique d'une organisation est conditionnelle au développement d'une culture d'adaptation aux changements. En d'autres mots, le fait d'investir dans les technologies ne suffit pas, à lui seul, pour obtenir les retombées attendues; il faut tout autant, si ce n'est plus, investir dans le développement de l'agilité et de la diversité des compétences de la main-d'œuvre (Brian McKenna, 2019).

Toujours en Australie, le groupe industriel Caterpillar emboîtera le pas à Rio Tinto cette année en construisant à Collie, en Australie-Occidentale, avec une subvention du ministère australien de l'Emploi, du Tourisme, des Sciences et de l'Innovation, un centre de formation technologique offrant des cours sur les opérations minières autonomes (Australian Mining, 2020c). Par ailleurs, mais cette fois du côté des entreprises technologiques, la firme Accenture a ouvert un centre d'innovation basé à Perth où les concepteurs et les fournisseurs de technologies peuvent aider les sociétés minières à accroître le rendement de leur investissement dans la technologie numérique. Cette entreprise, spécialisée en conseil sur les nouvelles technologies, a lancé son centre d'innovations minières pour permettre aux entreprises de saisir l'opportunité d'explorer des technologies telles que l'infonuagique (*cloud computing*), l'intelligence artificielle (IA), l'Internet des objets (IdO), la réalité virtuelle et augmentée, l'informatique quantique, la chaîne de blocs (*blockchain*) et les drones, qui sont des éléments liés à la transition 4.0. De plus, l'entreprise compte lancer un centre d'innovation mobile pouvant être expédié vers des sites miniers éloignés (Australian Mining, 2019b). Dans une foulée identique, Immersive Technologies a créé puis mis à la disposition des entreprises des centres d'expérience destinés à l'industrie minière. Ces centres favorisent la compréhension des dernières technologies (**figure 4**) et la culture collaborative à travers le partage des meilleures pratiques professionnelles (International Mining, 2019).

Figure 4 : Technologies de simulation (photo tirée de International Mining, 2019)

Ce type de centre pourrait s'apparenter au CEMI (Centre for Excellence in Mining Innovation, en Ontario, ou en français le Centre d'excellence en innovation minière) qui est situé à Sudbury, ou alors au CECM (Centre d'excellence en connectivité minière) du Québec qui a été récemment créé par l'organisme 48e Nord. En terminant, le ministre fédéral de l'Éducation, Dan Tehan, a annoncé le financement de six nouveaux centres de formation de l'Australian Research Council dans le but de renforcer la collaboration en matière de recherche entre les universités et les entreprises privées, et ce, afin de mieux arrimer les compétences des personnes apprenantes aux exigences du marché de l'emploi australien (The Educator Australia, 2019).

Au Canada, dans le cadre d'un partenariat mondial sur l'intelligence artificielle, le ministre fédéral de l'Innovation, des Sciences et du Développement économique et la ministre des Relations internationales et de la Francophonie du Québec ont annoncé la création d'un centre d'expertise international pour l'avancement de l'intelligence artificielle (IA). Ce centre, mis sur pied en collaboration avec l'industrie, la communauté scientifique et la société civile, devrait permettre un développement responsable de l'IA, avec pour mission l'analyse des mesures qui visent à renforcer la capacité nationale à commercialiser et à adopter les technologies liées à l'IA (Gouvernement du Canada, 2019). De plus, le gouvernement du

Québec a annoncé la création de l'Institut intelligence et données (IID) et la mise en place du Pôle d'expertise régionale en intelligence à l'Université Laval. Cet Institut, qui s'inscrit dans la stratégie pour l'essor du Québec en IA, fédère quatre centres de recherche et vise le développement des compétences de la main-d'œuvre en IA à travers la création d'une offre de formation continue spécialisée, ainsi que l'accompagnement des divers organismes et entreprises souhaitant intégrer l'IA dans leurs activités et projets (MEI, 2020a). En ce qui concerne les entreprises, IBM Canada et l'Université d'Ottawa ont lancé ensemble un pôle technologique en cybersécurité (Université d'Ottawa, 2019). L'importance grandissante des données à l'ère du numérique met en lumière un autre défi important du virage 4.0 des entreprises minières qui est la sécurisation des données des personnes, des systèmes, des processus et des équipements. Ce pôle tombe à point nommé, puisque les besoins du gouvernement, du secteur public et des entreprises en matière de compétences en cybersécurité, actuellement déjà importants, le deviendront encore plus au fur et à mesure que les entreprises minières adopteront et intégreront les nouvelles technologies numériques dans leurs activités (Valerie Bolden-Barrett, 2019). Par ailleurs, l'usine IBM de Bromont et l'Université de Sherbrooke ont renouvelé leur partenariat avec la Chaire de recherche CRSNG-IBM Canada en plus de lancer un projet de recherche et développement coopératif complémentaire en appui à la Chaire (Université de Sherbrooke, 2020). Tout en formant plus de 24 étudiantes et étudiants aux défis technologiques liés à l'augmentation de la puissance des composantes microélectroniques, grâce auxquelles les systèmes numériques et l'IA peuvent se développer encore plus vite, cette Chaire vise à développer de nouvelles approches de fabrication industrielle robuste et de nouveaux matériaux qui augmentent la résistance et la fiabilité des composants électroniques.

En outre, l'impact environnemental d'une mine est un élément-clé relatif, entre autres, à l'acceptabilité sociale du projet minier et à l'obtention des permis d'exploitation. Le développement de solutions environnementales pour l'ensemble du cycle de vie d'une mine, de l'exploration à la fermeture, est la principale mission sous-jacente au renouvellement du programme de recherche en environnement minier entre l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT), Polytechnique Montréal et six entreprises minières (Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2019). Les entreprises minières participantes sont les mines Agnico Eagle, la mine Canadian Malartic, IAMGOLD Corporation, la mine Raglan, Newmont Goldcorp – Éléonore et Rio Tinto Fer et Titane. Un éventail des initiatives des collèges du Canada peut être trouvé dans (Perspectives Collèges et Instituts Canada, 2019). Une initiative intéressante parmi ces dernières est celle du Centre d'intelligence artificielle du collège Durham qui met à la disposition des partenaires industriels les expertises, les installations et des plateformes de pointe en vue de trouver des solutions novatrices, intelligentes et autonomes (Durham College, 2019b).

En France, l'entrepreneuriat technologique a été mis de l'avant à travers le projet d'incubateur interécoles de l'IoT Valley, qui est une entreprise spécialisée dans le déploiement de solutions relatives à l'Internet des objets et à la transition technologique industrielle. Par cette initiative, l'entreprise et les différentes écoles partenaires veulent aider les jeunes et les entrepreneurs à constituer, à développer puis à concrétiser des idées d'entreprises à vocation technologique (Le Monde Informatique, 2019). Une autre initiative relevée par l'infolettre *MineAvenir* est le projet MINDS (pour Mines Initiative for Numerics and Data Science) créé pour doter l'industrie du futur d'un personnel maîtrisant les outils informatiques modernes en science prédictive qui font converger la simulation numérique, le calcul intensif, la science des données et l'intelligence artificielle (UP Magazine, 2019). MINDS est une plateforme de recherche et de développement numérique et interdisciplinaire qui favorise le travail collaboratif entre les équipes de 15 centres de recherche d'institutions offrant de la formation menant au secteur minier comme l'Institut Carnot MINES, MINES ParisTech, l'Institut Mines-Télécom, Mines d'Albi, d'Alès, de Douai et de Saint-Étienne, Télécom ParisTech.

Selon Elie Hachem, porteur du projet MINDS et professeur à l'école MINES ParisTech, MINDS « [...] offre la perspective d'un système à base d'intelligence artificielle capable d'intervenir en temps réel dans différents domaines d'expertise de MINES ParisTech : c'est une vision renouvelée de la thésaurisation du savoir et un outil moderne de transmission et d'enseignement » (UP Magazine, 2019). En allant dans le même sens, MINES ParisTech en collaboration avec l'entreprise SAFRAN, qui est spécialisée dans la haute technologie en aéronautique et en aérospatiale, a lancé la chaire de recherche BIGMEGA qui se consacrera à la mécanique avancée des matériaux de structure par apprentissage machine en utilisant des techniques de réduction de modèles et des réseaux de neurones issus de l'intelligence artificielle pour simuler les matériaux (safran-group.com, 2019).

Quelques initiatives sont à porter au crédit des États-Unis qui, d'ailleurs, viennent de signer un partenariat avec le gouvernement australien pour **développer des chaînes d'approvisionnement en minéraux critiques et stratégiques** (Australian Mining, 2020a). Ce partenariat concerne une initiative de l'University PARK en Pennsylvanie qui, avec les professeurs de 11 de ses unités de recherche, s'est dotée d'un centre d'expertise en technologies immersives afin, d'une part, d'offrir des services complets liés à l'enseignement, à l'apprentissage et à la recherche impliquant la technologie immersive comme la réalité virtuelle, la réalité augmentée, la vidéo à 360 degrés et la réalité mixte et, d'autre part, de mieux répondre aux exigences d'une société dont la dépendance aux technologies ne cesse de croître (Penn State University, 2019). Ce modèle collaboratif a été également appliqué à plus grande échelle par une équipe interdisciplinaire de l'Université du Nevada-Reno (UNR) comprenant trois collèges de l'université, l'Institut national pour la santé et la sécurité au travail et de nombreux partenaires industriels parmi lesquels Kinross Gold Corp., Komatsu, Newmont Goldcorp, Orica et Sandvik, et ce, dans le but d'équiper la main-d'œuvre minière de compétences-clés nécessaires à l'utilisation optimale des technologies comme l'intelligence artificielle (IA) (Engineering and Mining Journal, 2019b). Comme le déclare M. Javad Sattarvand, professeur adjoint d'ingénierie minière au UNR College of Science et chercheur principal du projet : « *La voie vers des opérations minières plus sûres et plus saines ne se fait que par le développement d'une capacité académique de ressources humaines avec une meilleure compréhension des infrastructures technologiques émergentes*[4] » (Engineering and Mining Journal, 2019b).

En somme, il semble clair que les bouleversements provoqués par l'industrie 4.0 ont catalysé la création et la prolifération d'une variété de centres et de projets visant à doter la future génération de compétences numériques et que cette tendance est observable dans le monde. Il s'avère également que la formation continue a pris une plus grande ampleur avec le bouleversement créé par la 4e révolution industrielle. De fait, considérant que la création ou la mise à jour des programmes de formation ne s'effectue pas à la même vitesse que la création et la mise sur le marché des nouvelles technologies, les entreprises minières, afin de bénéficier des retombées de l'intégration de ces technologies révolutionnaires dans leurs activités, comme le gain en productivité, une meilleure santé et sécurité du personnel minier, des opérations plus autonomes et des mines connectées plus intelligentes, recourent à des partenariats avec les établissements d'enseignement et les équipes de recherche universitaires pour doter leur personnel de compétences essentielles à l'ère du numérique ubiquitaire (Australian Mining, 2019c, 2019g; Daniel Gleeson, 2019; safran-group.com, 2019; Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2019).

Par ailleurs, la collaboration apparaît comme l'autre trame de fond qui est partagée par bon nombre d'articles examinés dans cette partie. La mise en commun des connaissances et des compétences dans les domaines d'expertise respectifs des établissements d'enseignement et des entreprises minières ainsi que l'appui des gouvernements semblent un pari gagnant pour la transformation

[4] Traduction libre.

numérique de la main-d'œuvre minière (48e Nord International – Mines, 2019; Australian Mining, 2019g, 2019h; Engineering and Mining Journal, 2019b; Le Monde Informatique, 2019; Manufacturers Monthly, 2019; NEO UQTR, 2019; Rudrajit Mitra, Bekir Genc, 2019; safran-group com, 2019; Université d'Ottawa, 2019; Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2019). Il s'agit dans ce cas de l'interconnexion non seulement entre tout le personnel d'une même entreprise, les logiciels et les équipements de l'entreprise (éviter les silos), mais également de la collaboration avec des partenaires d'autres secteurs industriels et même d'autres pays, qui sont importants pour le futur numérique du secteur minier. Comme le mentionne M. Simon van Wegen, directeur en solutions de données chez Komatsu : « plus vous collaborez, mieux vous devenez collaborateur, et c'est là qu'il se crée un effet d'entraînement qui ouvre la porte à la collaboration au sein de votre propre industrie, mais aussi avec d'autres industries[5] » (Russell A. Carter, 2019).

1.2. Les investissements et les partenariats financiers

La vitesse des innovations technologiques qui contraste avec la vitesse de mise à jour ou de modification des programmes de formation pousse les parties prenantes à avoir une collaboration plus étroite. Cette collaboration, notamment entre les établissements d'enseignement, les entreprises minières et les gouvernements, peut prendre de nombreuses formes et poursuivre divers objectifs. Les investissements financiers qui ont été recensés dans l'infolettre *MineAvenir* sont présentés dans le **tableau 3**, avec chaque montant y afférent lorsque celui-ci était précisé. Il est intéressant de noter que la sous-section précédente traitait du développement de compétences alors que les lignes suivantes s'attarderont principalement à l'aspect financier des investissements et des partenariats qui ont été établis. Exception faite du cas de la Banque africaine de développement (BAD) qui investira de 2020 à 2022 **1,2 M€** pour la formation des décideurs politiques du secteur minier (de la Guinée, du Libéria, du Niger, du Mali, de Madagascar, du Soudan du Sud, de la Sierra Leone et du Zimbabwe), la presque totalité des investissements dans ce tableau est en lien avec la formation numérique de la main-d'œuvre minière (Vanessa Ngono Atangana, 2020).

Étant donné que l'obtention d'une main-d'œuvre minière adaptée à la mutation technologique actuelle de l'industrie minière est un défi commun entre autres aux gouvernements, aux établissements d'enseignement et aux entreprises minières, bon nombre d'investissements financiers ont été effectués. En général, les formations qui sont offertes dans les établissements d'enseignement ou les organismes reconnus sont accréditées par les organismes gouvernementaux et les personnes diplômées constituent le personnel des entreprises minières. Dans cette perspective, l'adéquation entre les besoins de l'entreprise et les compétences des personnes diplômées nécessite la collaboration entre les entreprises et les partenaires du système éducatif.

[5] Traduction libre.

Tableau 3 : Les investissements financiers recensés dans l'infolettre MineAvenir

Pays	Type d'organisme	Montant	Objectifs
Afrique	Banque africaine de développement (BAD)[6]	1,20 M€	Former les décideurs politiques africains du secteur minier de 2020 à 2022 pour les aider à améliorer leurs revenus miniers
Australie	Rio Tinto investit dans un programme national de 4 ans	10 M$	Répondre au besoin croissant en compétences à l'ère du numérique
	Rio Tinto	2 M$	Développer les compétences requises pour travailler dans les centres d'opérations à distance de Rio Tinto. *Qualification de Rio Tinto reconnue par le Conseil d'accréditation de la formation de l'Australie-Occidentale*
	Ministre fédéral de l'Éducation	24,1 M$	Aider les chercheurs universitaires à trouver des solutions pratiques à un éventail de défis importants avec les nouvelles technologies
	Ministre de l'Éducation et de la Formation de l'Australie-Occidentale	1,53 M$	Nouveau programme de partenariats régionaux pour former les travailleurs relativement aux besoins et aux compétences ciblées par l'industrie
Canada	Ministère Innovation, Sciences et Développement économique et ministère des Relations internationales et de la Francophonie	10 M$ (Canada) + 5 M$ (Québec)	Développer une expertise internationale pour l'avancement de l'intelligence artificielle (IA) dans le cadre du Partenariat mondial sur l'intelligence artificielle (PMIA)
	Dawson College à Montréal[7]	1,5 M$	Transformer le collège en centre d'excellence en IA
	Gouvernement de l'Ontario	0,93 M$	Former près de 400 personnes aux métiers spécialisés où la main-d'œuvre se raréfie le plus
	IRME UQAT, Polytechnique Montréal et 6 entreprises minières	11,2 M$	Développer des solutions environnementales pour l'ensemble du cycle de vie d'une mine
	Gouvernement du Québec[5]	10,7 M$	Créer le Centre national intégré du manufacturier intelligent (CNIMI)
		3,09 M$	Apprendre l'IA par l'intermédiaire d'un tuteur intelligent (intelligence artificielle)
	Technologies Korbit à Montréal	2,60 M$	Développer une expertise internationale pour l'avancement de l'intelligence artificielle (IA) dans le cadre du Partenariat mondial sur l'intelligence artificielle (PMIA)
États-Unis	National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH)	1,25 M$	Développer une meilleure compréhension des technologies comme l'IA, l'IdO, les mégadonnées, la robotique, la téléopération, les technologies immersives, les drones, l'infonuagique, etc.

[6] Article non inclus dans l'infolettre *MineAvenir* de septembre 2019 à janvier 2020.

[7] Plus grande somme consacrée par un cégep à une initiative portant sur l'IA selon (Perspectives Collèges et Instituts Canada, 2019).

Les tendances générales en formation minière

Plusieurs acteurs de l'industrie minière en Australie abondent dans le sens de cette adéquation. C'est pour cette raison que l'entreprise minière Rio Tinto va investir **10 M$** dans un programme national sur quatre ans qui vise à accélérer le développement des compétences à l'ère du numérique comme la pensée critique, l'automatisation, la conception de systèmes et les sciences des données (Australian Mining, 2019g). Ce faisant, l'entreprise complète les **14 M$** de dollars qu'elle investit déjà chaque année dans des programmes d'éducation avec les partenaires éducatifs et les gouvernements d'Australie pour aider à répondre à la demande croissante de compétences en nouvelles technologies émergentes. Loin d'en rester là, l'entreprise a également engagé **2 M$** pour le développement des qualifications en automatisation ou en opérations autonomes. Selon Chris Salisbury, PDG de Rio Tinto, « [ces qualifications] surviennent à un moment critique pour l'industrie alors que nous cherchons à suivre le rythme des changements rapides. La clé de toute technologie est notre personnel, et c'est pourquoi la formation et le développement sont si importants. Ces qualifications fourniront aux employés, actuels et futurs, les compétences et la formation nécessaires pour prospérer dans notre industrie en évolution[8] » (Australian Mining, 2019h).

Cette formation par l'entreprise minière Rio Tinto a été accréditée par le Conseil d'accréditation de la formation de l'Australie-Occidentale et constitue le cours d'automatisation accrédité le plus élevé à ce jour (**figure 5**). Cela est un excellent exemple de la collaboration étroite entre une entreprise minière (dans ce cas l'entreprise Rio Tinto), un gouvernement (dans ce cas celui de l'Australie-Occidentale), un partenaire éducatif (dans ce cas le South Metropolitan TAFE , qui va offrir les cours) et un organisme gouvernemental d'accréditation des formations (dans ce cas le Training Accreditation Council) qui permet, d'une part, de doter la main-d'œuvre de compétences requises pour travailler dans des centres de commande d'opérations minières à distance et, d'autre part, de contribuer à la création de **la première qualification australienne en automatisation, le certificat IV en contrôle autonome et opérations à distance**. Dans le même souffle, le gouvernement fédéral australien a annoncé un financement de **24,1 M$** afin, comme il a été précédemment mentionné dans la **sous-section 1.1**, de renforcer la collaboration entre les universités et le secteur privé qui semble être un gage de succès dans le front commun contre la pénurie des compétences requises pour évoluer efficacement dans les mines intelligentes (The Educator Australia, 2019).

Figure 5 : Première qualification d'automatisation en Australie (photo tirée de Australian Mining, 2019h)

Au Canada, **15 M$** sur cinq ans ont été investis par le gouvernement fédéral et celui du Québec pour la création d'un centre destiné au développement de l'intelligence artificielle. Ce développement sera effectué en collaboration avec l'industrie, la communauté scientifique et la société civile, et cela, dans l'optique de faire du Canada et particulièrement du Québec une plaque tournante de l'industrie de l'IA (Gouvernement du Canada, 2019). C'est dans cette optique que le gouvernement québécois a annoncé le financement de la mise en place d'un pôle d'expertise régionale en IA à l'Université Laval à hauteur de **3,094 M$** (Thomas Calvi, 2020). De manière analogue, un pôle régional en enseignement

[8] Traduction libre.

[9] TAFE: Technical and further education, institution offrant de la formation professionnelle et continue.

supérieur du Centre-du-Québec qui rassemble l'expertise universitaire, collégiale et celle des entreprises manufacturières s'est vu accorder un montant de 10,7 M$ pour répondre autant à des enjeux de formation qu'à la pénurie de main-d'œuvre et aux besoins des entreprises. Une fois de plus, cela met clairement en lumière les retombées positives de la concertation des différents partenaires concernés par la formation minière (NEO UQTR, 2019). La concertation étant l'une des valeurs prônées par l'Institut national des mines du Québec, notre organisme entend porter une attention particulière aux différents mécanismes de concertation mis en place afin d'optimiser la formation minière.

Dans la même lancée, les partenaires industriels du programme de recherche UQAT-Polytechnique en environnement minier, présenté dans la **sous-section 1.1**, investiront ensemble un total de **11,2 M$** en recherche au cours de la période 2020-2026 (Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2019). Le collège Dawson consacrera, quant à lui, **1,5 M$** afin de devenir un chef de file en intelligence artificielle, et ce, par exemple en offrant du mentorat entre pairs pour les enseignants, en élaborant du matériel pédagogique et un programme en éthique de l'IA (Perspectives Collèges et Instituts Canada, 2019). Ce montant est la plus grande somme consacrée par un cégep à une initiative portant sur l'IA selon les auteurs.

Finalement, aux États-Unis, une subvention de **1,25 M$** de l'agence fédérale américaine pour la santé et la sécurité au travail (NIOSH - National Institute for Occupational Safety and Health) a été octroyée à l'Université du Nevada-Reno pour former une équipe interdisciplinaire qui abordera les défis liés à l'automatisation des opérations minières ainsi qu'à la sécurité et à la santé du personnel minier, et ce, à travers les technologies de l'industrie 4.0 comme l'intelligence artificielle, les drones et les mégadonnées (Engineering and Mining Journal, 2019b).

Bien que ce document ne prétende pas répertorier tous les investissements financiers effectués dans tous les pays du monde en lien avec le virage technologique de l'industrie minière, les éléments regroupés dans le **tableau 3** montrent qu'il y a au moins un investissement gouvernemental dans chacun des pays répertoriés en lien avec la formation de la main-d'œuvre. Mettre à niveau ou perfectionner les compétences de la main-d'œuvre semble donc être une préoccupation de tous les acteurs concernés, des gouvernements aux centres de formation en passant par les industriels et les organismes de législation et d'accréditation des programmes de formation. À ce propos, une amélioration de la formation par la création de nouveaux programmes ou la mise à jour des programmes actuels devra être effectuée pour mieux arrimer les connaissances et les compétences de la main-d'œuvre aux exigences relatives à la mutation 4.0 des entreprises minières et, ce faisant, garantir à l'industrie un personnel qualifié et productif (Australasian Mine Safety Journal, 2019b). Cela fait l'objet des paragraphes qui suivent.

1.3. Les nouveaux programmes et modes d'enseignement

L'évolution rapide des nouvelles technologies et surtout leur introduction dans les activités minières changent les habitudes de travail. Ce changement continuera de s'accentuer dans les prochaines années à mesure que les mines deviendront connectées et progressivement plus intelligentes. De ce fait, l'augmentation de la connectivité dans les mines, la mise en réseau d'un ensemble de systèmes et l'adoption croissante de l'Internet des objets stimulent la croissance de l'intelligence artificielle sur le marché de la cybersécurité. Ainsi, les technologies comme l'IA peuvent non seulement aider à la détection automatisée des menaces, mais aussi les combattre sans impliquer le personnel (OpenPR, 2019). C'est suivant cet élan que l'entreprise de Montréal Korbit (**tableau 3**), spécialisée en technologie pédagogique, ambitionne de révolutionner le secteur éducatif en concevant un tuteur intelligent, en d'autres termes une IA offrant de manière autonome un cours interactif et personnalisé sur l'apprentissage automatique et les sciences de données à plus de

2 400 étudiants en ligne (Institut québécois d'intelligence artificielle (MILA), 2019). D'autres modes d'apprentissage comme la formation en ligne, appelée « *e-learning* » (**figure 6**), déployée entre autres sous forme d'apprentissage mobile (formation accessible sur des appareils mobiles), autonome, immersif, vidéo et sur des plateformes innovantes, continuent de prendre plus d'ampleur dans le secteur de l'éducation avec l'essor des technologies émergentes (Asha Pandey, 2020). étudiants en ligne (Institut québécois d'intelligence artificielle (MILA), 2019). D'autres modes d'apprentissage comme la formation en ligne, appelée « e-learning » (figure 7), déployée entre autres sous forme d'apprentissage mobile (formation accessible sur des appareils mobiles), autonome, immersif, vidéo et sur des plateformes innovantes, continuent de prendre plus d'ampleur dans le secteur de l'éducation avec l'essor des technologies émergentes (Asha Pandey, 2020).

Figure 6 : Le cyberapprentissage (e-learning) (photo tirée de Chantelle Henriques, 2019)

La formation en ligne se définit comme « *l'utilisation des nouvelles technologies multimédias de l'Internet pour améliorer la qualité de l'apprentissage en facilitant d'une part l'accès à des ressources et à des services, d'autre part les échanges et la collaboration à distance*[10] », et devrait devenir une industrie de 200 G$ d'ici 2024 (Chantelle Henriques, 2019).

[10] Commission européenne, 2001 (https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2001/FR/1-2001-172-FR-F1-1.Pdf),

De plus, l'étude du REFAD publiée en automne 2019 met en exergue la nécessité de la transformation de l'offre de formation et de l'accompagnement des corps enseignant et professoral dans l'adaptation de leurs cours à la réalité et aux besoins sociétaux du 21e siècle (Alexane Saint-Amant-Ringuette, 2020). Ainsi, le secteur éducatif n'est pas en marge de la 4e révolution industrielle, bien au contraire. Toutefois, il est primordial de souligner que la récente enquête de la firme McKinsey & Company, menée dans le cadre d'un partenariat de recherche avec Microsoft, de même que la table ronde sur les enjeux du numérique organisée au dernier congrès de la Fédération des cégeps indiquent que, plutôt que de remplacer le corps enseignant comme certains pourraient le penser, les technologies existantes et émergentes les aideront à faire leur travail de manière plus efficace, par exemple en permettant des cours à distance ou en réaffectant une partie du temps « gagné » par l'automatisation de certaines tâches au soutien à l'apprentissage et au développement chez les élèves des compétences du futur (Élise Prioleau, 2020; McKinsey & Company, 2020). Les auteurs mentionnent aussi que, pour tirer profit de l'automatisation, le renforcement de la capacité des enseignants et des responsables d'établissement pour une exploitation à bon escient de la technologie, la concertation entre les établissements d'enseignement par le partage des bonnes pratiques et un choix judicieux des investissements à effectuer sont des impératifs. Cela concorde avec le **projet de diagnostic 4.0 d'un programme de formation** actuellement en cours à l'Institut national des mines qui serait un outil intéressant permettant, d'une part, d'avoir un portrait de l'état actuel d'un programme de formation et, d'autre part, de suggérer une feuille de route vers une formation 4.0 ou du développement d'une stratégie globale 4.0 de l'établissement d'enseignement.

Par ailleurs, en plus des initiatives présentées jusqu'à ce point, d'autres établissements d'enseignement comme le Collège Durham, le Collège Lionel-Groulx et le Collège de Bois-de-Boulogne, en collaboration avec le Cégep de Sainte-Foy, lanceront d'ici 2020 trois nouvelles formations : un nouveau certificat

en analyse, conception et mise en œuvre de l'intelligence artificielle (Durham College, 2019a), une formation sur mesure comprenant quatre modules que sont l'amélioration continue et l'optimisation des opérations, la gestion du changement, les implications de l'automatisation et l'entretien préventif et prédictif (Collège Lionel-Groulx, 2019), et un nouveau programme intitulé Spécialisation technique en intelligence artificielle (Cégep de Sainte-Foy, 2019). Dans les trois cas, l'objectif sous-jacent est de combler les exigences en compétences techniques nécessaires pour réaliser la recherche, la mise en œuvre et l'intégration de solutions innovantes associées à l'IA, à l'automatisation et à la robotisation (Collège Lionel-Groulx, 2019; Perspectives Collèges et Instituts Canada, 2019).

Dans le même ordre d'idées, « *[...] bien qu'il soit intéressant de noter que la technologie nécessitera la qualification des travailleurs, les experts estiment que les technologies telles que la réalité augmentée et la réalité virtuelle seront les outils qui accéléreront l'apprentissage, en particulier dans ces domaines*[11] » (Techwire Asia, 2019). À ces technologies immersives (Canadian Insider, 2019), il est notamment possible d'adjoindre les technologies de simulation (Australian Mining, 2019c) et les technologies de surveillance de la fatigue (Engineering and Mining Journal, 2019a). À cet effet, M. Jean-François Ross, enseignant au deuxième cycle du primaire à l'école de l'Aquarelle, entend développer une nouvelle manière d'intégrer efficacement la technologie en salle de classe en enseignement des sciences au primaire. Son projet vise la mise sur pied d'une situation d'apprentissage-évaluation portant sur la classification animale qui intègre un logiciel de cartographie conceptuelle (représenter graphiquement les informations autour d'un sujet, préciser et hiérarchiser les relations qui les unissent) (Université du Québec à Rimouski, 2019).

Pareillement, au Québec, le Dr Glyn Lawson, professeur agrégé à la Faculté de génie de l'Université de Nottingham en Angleterre, en collaboration avec une équipe de chercheurs, a exploré comment l'utilisation des informations multisensorielles (vision, chaleur et odeur) peut affecter la formation en matière de sécurité minière, c'est-à-dire la formation en matière de sauvetage dans les mines et de réponse aux diverses situations d'urgence comme la sécurité incendie, l'évacuation et les substances dangereuses. Les résultats de sa recherche laissent supposer que les expériences de réalité virtuelle multisensorielles (**figure 7**) améliorent les résultats d'apprentissage et l'engagement des personnes apprenantes tout en les impliquant plus activement que les formes traditionnelles de formation en santé et sécurité (Australasian Mine Safety Journal, 2019a).

Figure 7 : Réalité virtuelle multisensorielle (photo tirée de Australasian Mine Safety Journal, 2019a)

Dans le reste du Canada, une nouvelle forme d'apprentissage immersif sera bientôt introduite dans les salles de classe grâce à l'incorporation de programmes qui intègrent une plateforme interactive de réalité augmentée développée par MindFuel (également connue sous le nom de Science Alberta Foundation) et Agents of Discovery (Canadian Insider, 2019). L'objectif de ce type d'apprentissage sera de stimuler l'engagement de la population étudiante en lui offrant une expérience interactive et en renforçant son intérêt pour les disciplines de sciences, technologies, ingénierie et mathématiques (STIM), et ce, tout en la gardant activement impliquée dans les leçons.

[11] Traduction libre.

Un écho semblable aux précédents retentit en ce qui concerne Unity, la plateforme flexible de développement 3D en temps réel qui permet la formation du personnel minier en toute sécurité en créant des expériences de réalité virtuelle qui imite celle dans laquelle les travailleuses et les travailleurs opéreront et qui peut simuler un éventail de scénarios avec une rétroaction immédiate et visuelle (Australian Mining, 2019a). Cette expérience de formation immersive et interactive augmente la vitesse de transfert des connaissances, tout en supprimant la nécessité d'être à une proximité physique des actifs de la mine. À l'opposé, du côté de l'Afrique du Sud, c'est l'approche par apprentissage mixte qui a été privilégiée (voir la **sous-section 1.1**). Elle ouvre la porte à la formation de la main-d'œuvre minière en présentiel, mais aussi par le biais du cyberapprentissage, de la réalité virtuelle, de la modélisation de banc, des simulations et de l'apprentissage intégré dans une maquette en milieu de travail (Daniel Gleeson, 2019).

1.4. Les autochtones et les femmes dans le secteur minier

L'inclusion des communautés locales est un des défis que soulève le virage 4.0 des entreprises minières. En effet, les collectivités avoisinant les sites miniers ou les entreprises industrielles représentent un bassin de main-d'œuvre idoine pour les entreprises tout en contribuant au développement des régions, contrairement à un personnel qui serait présent uniquement dans le cadre du travail et transporté par navettage (familièrement appelé les *fly in fly-out*). C'est dans cette perspective que le ministère de l'Éducation et de la Formation de l'Australie-Occidentale, en partenariat avec les organismes qui dispensent la formation professionnelle et continue (les TAFE[12]) et les centres de ressources communautaires, a mis sur pied un programme régional d'apprentissage et de formation pour doter les communautés locales de compétences compétences spécifiques aux besoins des industries régionales (Manufacturers Monthly, 2019). Selon la ministre, Mme Sue Ellery, « […] *ces partenariats régionaux soutiennent le plan du gouvernement de l'État d'augmenter le nombre d'emplois dans la région de l'Australie-Occidentale de 30 000* »[13] (Manufacturers Monthly, 2019).

D'une manière similaire, M. Tony Pretorius, directeur de l'éducation, de la formation et du développement chez Murray & Roberts Cementation en Afrique du Sud, affirme créer « […] *des centaines de possibilités de carrière pour les jeunes sans-emploi des collectivités situées à proximité [des opérations de l'entreprise]* »[13], en faisant référence au centre de formation de la compagnie, la Murray & Roberts Training Academy, qui forme des jeunes sans-emploi aux compétences liées à l'exploitation minière et indispensables pour l'entreprise (Daniel Gleeson, 2019). Environ la moitié des personnes apprenantes sont des femmes, indique l'entreprise. Ce même pourcentage de femmes, soit 50 %, se retrouve dans la nouvelle cohorte des personnes autochtones diplômées du centre de formation professionnelle et d'emploi (en anglais Vocational Training and Employment Centre ou VTEC) de l'entreprise minière Fortescue Metals Group à Karratha, en Australie-Occidentale. De fait, le VTEC vise à offrir des possibilités d'emploi aux Autochtones, à briser les barrières sociales et à combler l'écart existant entre les populations autochtones et celles non autochtones sur le marché et dans les lieux de travail (Australian Mining, 2019d). Pour ce faire, l'entreprise garantit un emploi permanent après la formation pour les Autochtones. Cela crée en eux la motivation et leur donne l'engagement nécessaire pour terminer avec succès leur programme de formation. Le programme VTEC a aidé 875 Autochtones à trouver un emploi chez Fortescue depuis sa création en 2006 (Australian Mining, 2019d). Également, au Québec, à la Mine Raglan, où les employés nunavikois représentaient 22 % de la main-d'œuvre en 2019, le programme Tamatumani a été créé en 2008 pour

[12] TAFE: Technical and further education, institution offrant de la formation professionnelle et continue.

[13] Traduction libre.

proposer des formations (sur mesure ou non) aux personnes inuites désireuses de devenir des mineures et des mineurs sous terre et pour soutenir le personnel inuit en premier lieu dans son intégration dans l'entreprise et dans le développement de ses compétences professionnelles, et en deuxième lieu dans l'accession de ceux qui sont qualifiés à des postes de hautes responsabilités (Mine Raglan, 2019).

« *Des équipes plus inclusives et diversifiées surpassent les autres en matière de sécurité, de productivité et de culture* », a déclaré M. Sundeep Singh, responsable des achats du groupe BHP, la plus grande entreprise minière au monde[14] (Australian Mining, 2020b). Toujours selon M. Singh, en accordant à la diversité de la main-d'œuvre une attention similaire à celle relative à la transformation numérique et au développement durable, l'entreprise, dans laquelle les femmes représentaient environ 24,5 % des effectifs en 2019, a pu constater la valeur ajoutée de la diversité des genres en enregistrant une réduction de 67 % des taux de blessures, une amélioration de 11 % du respect du calendrier, une diminution de 28 % des absences non planifiées et une augmentation de 21 % de la fierté de travailler.

Dans un secteur dominé par les hommes, comme le montre le portrait numérique des mines au Québec effectué par l'Institut national des mines (INMQ, 2019), le pourcentage de femmes devrait croître avec l'intégration des nouvelles technologies numériques dans les opérations minières qui nécessiteront des compétences polyvalentes plus transversales (en anglais *soft skills*) et transférables que celles purement physiques. Du fait notamment de l'automatisation croissante de diverses tâches dans les entreprises, certaines compétences non techniques, comme la créativité, l'adaptabilité, la curiosité, le savoir travailler ensemble et l'intelligence émotionnelle, sont actuellement parmi les plus recherchées par les entreprises dans tous les secteurs (Deanna (Lazzaroni) Pate, 2020; Journal Le Monde, 2020; Tracey Lall, 2020). Ainsi, la formation, en plus d'être un incontournable dans la transition technologique des entreprises puisqu'elle assure aux mines que les technologies introduites dans leurs opérations sont utilisées de manière appropriée, s'avère également un vecteur d'inclusion sociale, de diminution de disparité et d'intégration en entreprise.

[14] https://www.novethic.fr/actualite/energie/transition-energetique/isr-rse/la-plus-grande-entreprise-miniere-au-monde-bhp-va-tourner-le-dos-au-charbon-147331.html

2

LES TENDANCES TECHNOLOGIQUES DE L'INDUSTRIE MINIÈRE

Les nouvelles technologies sont en train de façonner le paysage industriel et minier d'une manière sans précédent. Plusieurs dirigeants de PME et de mines les considèrent comme un facteur clé de succès qui favorise l'augmentation de la productivité (QuébecInnove, 2019) de même que la santé et la sécurité au travail (INMQ, 2019). Le **tableau 4** rassemble un ensemble de technologies introduites dans des opérations minières et qui ont émergé des articles de l'infolettre *MineAvenir* de l'Institut national des mines publiés entre le 12 septembre 2019 et le 30 janvier 2020. Il montre que l'importance des données est croissante et que les technologies immersives et d'automatisation continuent d'être intégrées dans les opérations minières. Ces tendances technologiques font l'objet de cette deuxième partie.

Tableau 4 : Les tendances générales en technologie dans le secteur minier

TENDANCES TECHNOLOGIQUES DE L'INDUSTRIE MINIÈRE	Nombre d'articles abordant le sujet
DONNÉES (gestion, traitement, acquisition, sécurisation, stockage, etc.)	
Cybersécurité *(données, systèmes informatiques, machines, etc.)*	**4**
Capteurs (*collecte ou acquisition de données*)	2
Intelligence artificielle	2
Données massives (*Big data*)	1
Internet des objets (IdO)	1
Intégration et analyse des données en temps réel	1
TECHNOLOGIES ET OUTILS NUMÉRIQUES	
Réalité virtuelle, augmentée et mixte	**2**
Plateformes mobiles / Équipement personnel intelligent	1
Connectivité LTE / 5G	1
Logiciels / Applications	1
AUTOMATISATION ET ROBOTISATION	
Contrôle à distance et opérations télécommandées	**3**
Véhicules et transport autonomes	2
Drones	2
Robotique	1
Système d'extraction mécanisée des gisements miniers	1
AUTRES TECHNOLOGIES ET OUTILS NUMÉRIQUES	
Simulateurs	**1**
3D (*impression, modélisation, etc.*)	-
Chaîne de blocs	-
Mines électriques / Véhicules électriques	-
Panneaux solaires	-

Les tendances générales en formation minière

2.1. Une place plus importante pour les données

Passera-t-on de mineur de roches à mineur de données avec la transformation numérique des entreprises minières? Les données deviendront-elles la ressource minérale qu'on devra transformer en métal précieux? Voilà autant de questions qui n'existaient pas il y a quelques années, mais qui trouvent leur légitimité dans la présente époque où les données, peu importe leur type et leur origine, prennent une place de plus en plus prépondérante dans les activités minières et même dans la vie quotidienne. Utilisées à bon escient, les données permettent notamment de suivre un humain, un équipement, un inventaire ou un produit en temps réel et de prendre les décisions appropriées, augmentant de la sorte l'efficacité et la productivité de la mine tout en rendant les opérations plus sûres pour le personnel minier.

D'après l'International Data Corporation (IDC), filiale de l'International Data Group (IDG), un leader des médias technologiques et des données, et plus précisément d'après M. Benjamin Kirkwood, directeur de recherche sénior chez IDC Energy Insights, et Mme Émilie Ditton, IDC Asia/Pacific Energy et directrice mondiale mines, en 2020, les dépenses liées aux technologies de l'information augmenteront de plus de 50 % dans le secteur minier et, au cours des prochains mois, l'industrie minière va utiliser beaucoup plus de technologie que jamais auparavant (Techwire Asia, 2019). La récente enquête de la firme Accenture auprès de 1 500 cadres supérieurs d'entreprises œuvrant dans 16 secteurs d'activités et réalisant un chiffre d'affaires supérieur à 1 G$ dans 12 pays à travers le monde abonde en ce sens, en relevant entre autres que 84 % des dirigeants répondants estiment qu'ils devront déployer massivement l'intelligence artificielle (IA) s'ils veulent atteindre leurs objectifs de croissance et que 175 Zo (1 zettaoctet = 10^{21} octets)[15] de données seront créés d'ici 2025 (Accenture, 2019). Cependant, si le défi de l'acquisition des données et de leur traitement peut être relevé à l'aide de technologies comme l'Internet des objets (IdO) et l'IA, il n'en est pas de même pour leur sécurisation. À cet égard, dans l'environnement numérique découlant du virage 4.0 entrepris par les entreprises minières, les possibilités de l'IdO, jumelées à celles des applications mobiles, des technologies de surveillance (Engineering and Mining Journal, 2019a) et de la mise en réseau des différents secteurs d'une mine sont à l'origine d'une avalanche de données et, tel un processus minéral, ces données doivent être transformées en informations utiles pour les preneurs de décisions. Il est donc important de prendre des dispositions de sécurité pour protéger les personnes, les équipements et les actifs informatiques matériels et immatériels. Pour ce faire, certains auteurs recommandent aux équipes de cybersécurité d'améliorer la gestion des risques, d'intégrer la cybersécurité directement dans les chaînes de valeur et de tenir compte des futures innovations des entreprises (James Kaplan, Wolf Richter et David Ware, 2019). D'autres pensent que les nouvelles technologies, comme l'intelligence artificielle utilisée en cybersécurité, seraient une solution pour conserver une avance sur les menaces et sécuriser les ressources, surtout en considérant l'adoption de l'IdO et la numérisation grandissante de l'industrie minière (OpenPR, 2019). Avec une demande en forte croissance, le marché mondial de la sécurité informatique devrait dépasser les 150 G$ en 2023 (Alexandre Boero, 2020).

2.2. La connectivité dans les mines et les équipements intelligents

L'adoption des technologies comme l'Internet des objets (IdO) doit se faire en parallèle avec le déploiement d'une infrastructure réseau et de systèmes de communication capables de supporter et de transmettre de manière intégrale aux centres d'exploitation destinés à cette fin l'ensemble des voix, des images et d'autres données provenant des personnes (Engineering and Mining Journal,

[15] https://fr.wikipedia.org/wiki/Octet

2019a), des processus et des équipements intelligents pour une prise de décision en temps réel.

Figure 8 : Tablette robuste Toughbook de Panasonic (photo tirée de Australian Mining, 2019e)

Par exemple, tout comme les mines LaRonde en Abitibi et Raglan dans le Nord-du-Québec, qui ont aménagé leur réseau privé souterrain respectivement en 2018 et 2019, la mine de nickel VALE à Sudbury déploiera des communications LTE (*Long Term Evolution*) dans ses opérations minières souterraines canadiennes. D'après l'entreprise, ce sera le plus grand réseau LTE souterrain privé au monde. En fait, la connectivité fait partie intégrante des huit éléments du plan de transformation numérique de l'entreprise, les autres éléments étant l'usine intelligente, l'automatisation des mines, la main-d'œuvre numérique, la planification intégrée, l'analyse avancée, la réduction des risques en santé, sécurité, environnement et l'innovation (Northern Ontario Business, 2019). Selon M. Brad Atkins, directeur de la transformation numérique pour les opérations de VALE dans l'Atlantique Nord, «*la mise en œuvre de la main-d'œuvre numérique signifie équiper les mineurs de smartphones, de tablettes ou d'un appareil similaire pour les aider à prendre les bonnes décisions au bon moment. Cela permettrait une communication directe entre les travailleurs ainsi qu'entre la surface et le sous-sol*» (Northern Ontario Business, 2019). De tels appareils mobiles (**figure 8**), qui seront utilisés sous terre, dans des conditions extrêmes avec la présence de poussières, d'éclaboussures, de faible luminosité et à des températures variables, devraient être étanches, robustes, fiables et avoir une bonne autonomie sans toutefois perdre leur convivialité (Australian Mining, 2019f).

Le réseau LTE dans les mines ouvre la porte à des opérations téléopérées depuis la surface (parfois à des kilomètres du site minier) ou totalement automatisées, et ce, notamment à des moments où les sites miniers ne peuvent traditionnellement pas être exploités, comme durant la présence des gaz de dynamitage ou lors des changements de quart de travail. Le gain en productivité qui s'ensuit est non négligeable. D'ailleurs, Rio Tinto a acheté 20 camions autonomes de 40 tonnes pour son complexe minier Koodaideri en mai 2019, et le producteur de minerai de fer ukrainien Ferrexpo a déclaré en novembre qu'il convertissait 15 de ses camions de transport en fonctionnement autonome (Carly Leonida, 2019). C'est à ce propos que M. Aidan Ayres, consultant principal en exploitation minière chez AMC Consultants, a déclaré que «*les camions évoluant suivant le système de transport autonome ont besoin, pour fonctionner en toute sécurité, de leur emplacement actuel, de l'itinéraire vers leur destination et de l'emplacement des autres équipements. […] Pour fournir ces informations et disposer d'un réseau de contrôle et de communication, une couverture LTE doit être établie dans tout l'environnement d'exploitation du camion*» (Carly Leonida, 2019). C'est dans le même ordre d'idées que l'entreprise Scania a introduit un concept de camion entièrement autonome sans cabine (**figure 9**), c'est-à-dire sans possibilité pour une personne d'y entrer pour une potentielle intervention (Australian Mining, 2019i).

Figure 9 : Camion autonome Scania AXL (photo tirée de Australian Mining, 2019i)

2.3. Les technologies immersives et de simulation

Les technologies immersives comprennent les outils qui plongent l'utilisateur en immersion. Il s'agit notamment des technologies de réalité virtuelle, de réalité augmentée et de réalité mixte. Elles ont été largement abordées dans la **section 1.1** et dans le **tableau 2** où on a montré qu'elles étaient utilisées particulièrement en formation pour le développement des compétences du personnel du secteur des mines. Il faut toutefois rapporter le cas de la firme Honeywell, fortement engagée dans les nouvelles technologies, qui a lancé une plateforme (**figure 10**) qui intègre à la fois les possibilités de réalité virtuelle et de réalité augmentée pour créer des solutions qui contribuent à la sécurité du personnel de l'industrie minière. Cette plateforme met les technologies émergentes au service de l'humain, par exemple en représentant virtuellement un actif et en utilisant cette représentation durant toute la durée de vie de cet actif (Australian Mining - Safe to Work, 2019).

Figure 10 : Illustration d'une plateforme Honeywell (tirée de Australian Mining - Safe to Work, 2019)

2.4. Les robots et les drones

Les robots et les drones sont des technologies que les entreprises adoptent de plus en plus dans les mines. De fait, ils permettent entre autres d'aller dans des zones jugées dangereuses pour le personnel, comme des zones potentielles d'effondrement ou d'intégrité douteuse, et de se rendre dans des endroits inaccessibles ou difficilement accessibles par le personnel. Les robots et les drones peuvent également travailler en tout temps, à toute heure et dans des conditions parfois extrêmes, et ce, avec une efficience qui dépasse largement celle des humains. À ce propos, l'entreprise technologique SafeSight Exploration, spécialisée dans les drones et leurs applications dans le secteur minier, en coopération avec Redpath Mining, a créé le MRC Rail Runner (**figure 11**), un robot utilitaire qui peut inspecter les montées dans les mines souterraines (TimminsToday.com, 2019). Ce robot a été conçu pour prendre en charge efficacement les aspects pénibles et dangereux du travail d'inspection visuelle obligatoire de certains chantiers souterrains comme les élévations. Il effectue les tâches demandées en cinq fois moins de temps qu'il n'en faut au personnel humain et, de la sorte, démontre bien que la robotisation, l'intelligence artificielle et plus généralement la technologie, si leur adoption et leur implantation sont bien gérées, ne sont pas des ennemis de la main-d'œuvre, mais des compagnons de travail (La Presse canadienne, 2020; Tracey Lall, 2020).

Figure 11 : MRC Rail Runner de SafeSight (photo tirée de TimminsToday.com, 2019)

Cette même entreprise a également relevé le défi de mettre en œuvre des drones d'arpentage parfaitement contrôlables à de grandes profondeurs,

et ce, malgré la pression de l'air et les problèmes de localisation sous terre. Ces drones (**figure 12**) ont été créés pour la mine souterraine Hoyle Pond du district aurifère Porcupine de Newmont Goldcorp dans le dessein d'effectuer des analyses par balayage des chantiers de la mine. L'amélioration des processus de rapprochement, le perfectionnement des modèles de blocs et la réduction de la dilution du minerai récupéré représentent certains des bénéfices les plus prometteurs que ces drones sont susceptibles d'apporter au secteur minier (CIM MAGAZINE, 2019). « *Nous obtenons toutes les données [relevé du drone, paramétrage de l'appareil et collecte des données en 20 ou 25 minutes avec une durée de vol de 3 à 5 minutes], et des données de meilleure qualité, dans un ensemble plus complet que ce que nous obtenions en 45 minutes ou une heure* », a déclaré M. Paul Lévesque, directeur de l'amélioration continue à Porcupine. Le développement des drones dans l'industrie minière continuera d'influencer significativement le secteur minier, notamment en ce qui concerne la surveillance et l'inspection des opérations visant l'atteinte de milieux de travail toujours plus sûrs et sécuritaires pour le personnel, la réalisation de levés et de cartographie automatiques pour collecter des données de manière illimitée tout en économisant sur le coût horaire, la gestion des stocks à travers des modèles de terrain générés et de suivi, l'optimisation de la voie de transport pour assurer un transit sûr et uniforme en fonction de l'état des routes, et la gestion des barrages de résidus pour les mesurer et ainsi éliminer le risque d'arpentage manuel (Daniel Brightmore, 2019).

Figure 12 : Illustration de l'utilisation du drone dans la mine souterraine Hoyle Pond (tirée de CIM MAGAZINE, 2019)

2.5. Le leadership québécois dans le secteur des mines

Au Québec, avec un appui du gouvernement, un nouveau type d'équipement a été mis en œuvre par l'entreprise de l'Abitibi-Témiscamingue Minrail. Il s'agit d'un système d'extraction mécanisée sur rails ancré au plafond et muni de crémaillères, qui supporte les outils de travail et le personnel. Le Shallow Angle Mining System (SAMS) devrait permettre l'augmentation des taux d'extraction des gisements miniers qui pourraient passer de 60-70 % à environ 90-95 % d'après le concepteur (MEI, 2020b). Le Québec a également lancé, selon (Kylie Williams, 2020), le premier programme de certification au monde pour l'exploration minière. Le nouveau programme ÉCOLOGO, résultat d'un partenariat entre l'AEMQ (Association de l'exploration minière du Québec), la Chaire en entrepreneuriat minier de l'UQAT-UQAM à Rouyn-Noranda, le gouvernement du Québec et le groupe MISA (Mines-Innovation-Solutions-Applications), permet notamment de certifier la conformité d'un procédé d'exploration au regard des normes environnementales, sociales et économiques et, de cette façon, d'augmenter la rigueur dans les pratiques existantes, de renforcer les relations avec les communautés locales tout en contribuant au développement responsable des sociétés d'exploration. Cette certification vient consolider la position de l'industrie minière québécoise sur la scène mondiale. En prêchant par l'exemple de la sorte, le Québec agit comme un chef de file international dans le secteur des mines.

Conclusion

En définitive, force est de constater, à la fin de cet ouvrage, que la culture collaborative ou la concertation est la principale tendance qui se trouve en filigrane de la presque totalité des articles issus de la veille informationnelle *MineAvenir* de l'Institut national des mines du Québec du 12 septembre 2019 au 30 janvier 2020. **La mise en commun des expertises des établissements d'enseignement, des entreprises minières, des entreprises à forte orientation technologique, des centres de recherche, des organismes de développement et d'accréditation des formations, ainsi que l'appui des gouvernements constituent la ligne de conduite adoptée par de nombreux pays.** Cette formule gagnante brise les silos dans l'entreprise et entre les organisations, favorise le partage des connaissances, encourage la concertation, catalyse le développement de partenariats et, ce faisant, permet de former un front commun efficace pour relever les défis inhérents aux perturbations transformationnelles relatives au virage technologique des entreprises minières.

Par ailleurs, il apparaît également, au terme de cet ouvrage, que **l'humain est au centre de la transition révolutionnaire 4.0 des entreprises minières et qu'une main-d'œuvre agilement compétente, numériquement talentueuse et culturellement ancrée dans des pratiques exemplaires d'amélioration continue de ses compétences est la clé d'une transformation 4.0 réussie.** Cet état de fait a pu être constaté à partir de nouvelles réalités comme les centres d'expertise technologique et d'accompagnement, du personnel professionnel de l'industrie minière, ainsi que grâce aux investissements colossaux effectués dans le but de permettre au personnel minier d'acquérir les compétences essentielles pour évoluer efficacement dans un environnement minier où les innovations technologiques continuent de modifier en profondeur et de manière progressive les méthodes traditionnelles de travail, notamment en rendant les mines de plus en plus autonomes.

Avec l'augmentation grandissante de la connectivité dans les mines et les possibilités de mines connectées que cela offre, ces tendances suggèrent également de **surveiller l'évolution de l'appropriation des concepts et des pratiques typifiques en cybersécurité et en intelligence artificielle dans la science des données par les différents acteurs industriels, éducatifs et gouvernementaux qui œuvrent dans le secteur minier.**

Références

48e Nord International – Mines. (2019). *Mission au Maroc : Pour mieux connaître les possibilités du secteur minier et de la formation minière.* http://www.48inter.com/evenement/mission-maroc/

Accenture. (2019). *AI Built To Scale.* Research report - Accenture Applied Intelligence. https://www.accenture.com/us-en/insights/artificial-intelligence/ai-investments

Alexandre Boero. (2020). *Ça flambe ! Le marché de la cybersécurité devrait peser 150 milliards de dollars en 2023.* https://www.msn.com/fr-fr/finance/other/%C3%A7a-flambe-le-march%C3%A9-de-la-cybers%C3%A9curit%C3%A9-devrait-peser-150-milliards-de-dollars-en-2023/ar-BBYWPpm

Alexane Saint-Amant-Ringuette. (2020). *Stratégies de gestion et pratiques professionnelles à l'ère du numérique*. https://ecolebranchee.com/strategies-de-gestion-et-pratiques-professionnelles-a-lere-du-numerique/

Asha Pandey. (2020). ELearning Trends In 2020. *eLearning iNDUSTRY.* https://elearningindustry.com/elearning-trends-in-2020

Australasian Mine Safety Journal. (2019a). *Application of multi-sensory virtual reality in safety training.* https://www.amsj.com.au/application-of-multi-sensory-virtual-reality-in-safety-training/

Australasian Mine Safety Journal. (2019b). *Mining training conference to focus on quality training.* https://www.amsj.com.au/mining-training-conference/

Australian Mining. (2019a). *A new era of mine safety becomes reality.* https://www.australianmining.com.au/features/a-new-era-of-mine-safety-becomes-reality/

Australian Mining. (2019b). *Accenture launches mining innovation hub in Perth.* https://www.australianmining.com.au/news/accenture-launches-mining-innovation-hub-in-perth/

Australian Mining. (2019c). *Byrnecut improves staff skills with Immersive Technologies simulation.* https://www.australianmining.com.au/news/byrnecut-improves-staff-skills-with-immersive-technologies-simulation/

Australian Mining. (2019d). *Fortescue employs latest Aboriginal graduates.* https://www.australianmining.com.au/news/fortescue-employs-latest-aboriginal-graduates/

Australian Mining. (2019e). *One to watch : Mining's toughest rugged computer.* https://www.australianmining.com.au/features/one-to-watch-minings-toughest-rugged-computer/

Australian Mining. (2019f). *Panasonic improves mining operations with rugged tablets.* https://www.australianmining.com.au/features/panasonic-improves-mining-operations-with-rugged-tablets/

Australian Mining. (2019g). *Rio Tinto initiative to focus on developing digital skills.* https://www.australianmining.com.au/news/rio-tinto-initiative-to-focus-on-developing-digital-skills/

Australian Mining. (2019h). *Rio Tinto launches Australian-first automation qualification.* https://www.australianmining.com.au/news/rio-tinto-launches-australian-first-automation-qualification/

Australian Mining. (2019i). *Scania targets mine sites with cabless autonomous concept.* https://www.australianmining.com.au/news/scania-targets-mine-sites-with-cabless-autonomous-concept/

Australian Mining. (2020a). *Australia launches critical minerals office.* https://www.australianmining.com.au/news/australia-launches-critical-minerals-office/

Australian Mining. (2020b). *Mid-tier miners make progress with diversity.* https://www.australianmining.com.au/features/mid-tier-miners-make-progress-with-diversity/

Australian Mining. (2020c). *WesTrac chooses Collie for WA automation centre.* https://www.australianmining.com.au/news/westrac-chooses-collie-for-wa-automation-centre/

Australian Mining - Safe to Work. (2019). *AR/VR light the future in mine safety.* https://safetowork.com.au/ar-vr-light-the-future-in-mine-safety/

Brian McKenna. (2019). Talent shortage impedes UK business data analytics efforts. *Computer Weekly.* https://www.computerweekly.com/news/252472547/Talent-shortage-impedes-UK-business-data-analytics-efforts

Burning Glass Technologies. (2018). *Is the Pace of Technology Driving the STEM Skills Gap?* https://www.burning-glass.com/blog/pace-technology-driving-the-stem-skills-gap/

Canadian Insider. (2019). *Augmented reality provides a distinct learning environment for Canadian classrooms : MindFuel and Agents of Discovery collaborate on new Wonderville.org lesson plans.* https://www.canadianinsider.com/augmented-reality-provides-a-distinct-learning-environment-for-canadian-classrooms-mindfuel-and-agents-of-discovery-collaborate-on-new-wonderville-org-lesson-plans

Carly Leonida. (2019). Optimizing Autonomous Haulage. *Engineering and Mining Journal.* https://www.e-mj.com/features/optimizing-autonomous-haulage/

Cégep de Sainte-Foy. (2019). Spécialisation technique en intelligence artificielle. *Formation continue et services aux entreprises.* https://dfc.cegep-ste-foy.qc.ca/programmes-et-cours/informatique/specialisation-technique-en-intelligence-artificielle/

Chantelle Henriques. (2019). *Elearning Industry Growth : A Look at Where Online Learning is Headed*. Voices.com. https://www.voices.com/blog/elearning-industry-growth-look-online-learning-headed/

CIM MAGAZINE. (2019). *Les drones à la rescousse des mines souterraines.* https://magazine.cim.org/fr/technologie/underground-air-support-fr/

Collège Lionel-Groulx. (2019). *Un partenariat de bon augure pour l'industrie 4.0 !* Communiqué de presse. http://www.clg.qc.ca/fileadmin/clg/media/2019-12-10-Communiquedepresse4.0.pdf

Daniel Brightmore. (2019). How drone technology is influencing the mining industry. *Mining Global*. https://www.miningglobal.com/technology/how-drone-technology-influencing-mining-industry

Daniel Gleeson. (2019). Murray & Roberts Cementation expands Bentley Park training facilities. *International Mining*. https://im-mining.com/2019/10/22/murray-roberts-cementation-expands-bentley-park-training-facilities/

Deanna (Lazzaroni) Pate. (2020). The Skills Companies Need Most in 2020—And How to Learn Them. *LinkedIn Learning*. https://www.linkedin.com/pulse/skills-companies-need-most-2020and-how-learn-them-lazzaroni-pate/

Durham College. (2019a). *Artificial Intelligence Analysis, Design and Implementation (graduate certificate)*. https://durhamcollege.ca/programs/artificial-intelligence-analysis-design-and-implementation-graduate-certificate

Durham College. (2019b). *The AI Hub*. https://durhamcollege.ca/about/office-of-research-services-innovation-and-entrepreneurship-orsie/the-ai-hub

Élise Prioleau. (2020). Les technologies numériques, frein ou accélérateur de la réussite ? *Portail du réseau collégial du Québec*. http://lescegeps.com/pedagogie/approches_pedagogiques/les_technologies_numeriques_frein_ou_accelerateur_de_la_reussite_

Engineering and Mining Journal. (2019a). *Lessons Learned From 10 Years of Fatigue Monitoring*. https://www.e-mj.com/features/lessons-learned-from-10-years-of-fatigue-monitoring/

Engineering and Mining Journal. (2019b). *UNR Receives Grant to Advance Technology, Automation in Mines*. https://www.e-mj.com/breaking-news/unr-receives-grant-to-advance-technology-automation-in-mines/

Global Mining Guidelines Group (GMG). (2019). *Guideline for the implementation of autonomous systems in mining*. https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:6580419236328546305/

Gouvernement de l'Ontario. (2020). *L'Ontario agit pour combler l'écart entre les compétences existantes et requises pour les métiers spécialisés*. Communiqué de presse. https://news.ontario.ca/mol/fr/2020/01/lontario-agit-pour-combler-lecart-entre-les-competences-existantes-et-requises-pour-les-metiers-spec.html

Gouvernement du Canada. (2019). *Le gouvernement du Canada et le gouvernement du Québec annoncent la création d'un centre d'expertise international à Montréal pour l'avancement de l'intelligence artificielle*. Communiqué de presse. https://www.canada.ca/fr/innovation-sciences-developpement-economique/nouvelles/2019/09/le-gouvernement-du-canada-et-le-gouvernement-du-quebec-annoncent-la-creation-dun-centre-dexpertise-international-a-montreal-pour-lavancement-de-lin.html

Hélène Bégin. (2019). *Pénurie de main-d'œuvre au Québec et en Ontario : Quels régions et secteurs d'activité sont les plus touchés?* Desjardins - Point de vue économique. https://www.desjardins.com/ressources/pdf/pv031319f.pdf

Institut québécois d'intelligence artificielle (MILA). (2019). *KORBIT, une startup issue de MILA lève 2 millions $ pour transformer l'éducation*. https://mila.quebec/korbit-une-startup-issue-de-mila-leve-2-millions-pour-transformer-leducation/

International Mining. (2019). *Immersive Technologies Experience Centres expose miners present & future to the latest simulation technology*. https://im-mining.com/2019/10/31/immersive-technologies-experience-centres-expose-miners-present-future-latest-simulation-technology/

James Kaplan, Wolf Richter et David Ware. (2019). Cybersecurity : Linchpin of the digital enterprise. *McKinsey and Company*. https://www.mckinsey.com/business-functions/risk/our-insights/cybersecurity-linchpin-of-the-digital-enterprise?cid=other-eml-alt-mip-mck&hlkid=3683f9a98b2749c286256d179dd77fa0&hctky=11383446&hdpid=7ebccd83-db7d-4213-89f8-82761d45afb6

jeuneafrique.com. (2019). *Sénégal : Une nouvelle école dédiée à l'intelligence artificielle à Dakar*. https://www.jeuneafrique.com/emploi-formation/843781/senegal-une-nouvelle-ecole-dediee-a-lintelligence-artificielle-a-dakar/

Journal Le Monde. (2020). *Relever le défi des compétences du futur*. https://www.lemonde.fr/campus/article/2020/01/29/relever-le-defi-des-competences-du-futur_6027682_4401467.html

Kylie Williams. (2020). Le Québec lance le premier programme au monde de certification pour l'exploration minière. *CIM MAGAZINE*. https://magazine.cim.org/fr/actualit%C3%A9s/2019/worlds-first-exploration-certification-program-launched-in-quebec-fr/

La Presse canadienne. (2020). *Les technologies ne menaceraient pas la main-d'œuvre à grande échelle*. https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1454823/technologies-menaceraient-pas-main-oeuvre

Le Monde Informatique. (2019). *L'IoT Valley crée un programme d'incubation inter-écoles*. https://www.lemondeinformatique.fr/actualites/lire-l-iot-valley-cree-un-programme-d-incubation-inter-ecoles-76924.html

Manufacturers Monthly. (2019). *WA invests in targeted regional skills development*. https://www.manmonthly.com.au/news/wa-regional-skills-development/

McKinsey & Company. (2020). *How artificial intelligence will impact K-12 teachers*. https://www.mckinsey.com/industries/social-sector/our-insights/how-artificial-intelligence-will-impact-k-12-teachers?cid=other-eml-alt-mip-mck&hlkid=4e8b10fdf6b44d159dacacea9a7b4ff5&hctky=11383446&hdpid=94fdb37e-ea26-4953-9afe-bd7bea988e49#

MEI. (2020a). *Essor de l'intelligence artificielle dans la Capitale-Nationale. Plus de 3 M$ pour la création du Pôle d'expertise régionale en intelligence artificielle*. Communiqué de presse. *https://www.economie.gouv.qc.ca/ministere/salle-de-presse/communiques-de-presse/communique-de-presse/?no_cache=1&tx_ttnews[tt_news]=24397&cHash=4379ea416a1e1b6782b57fca852e0ca6*

MEI. (2020b). *Québec appuie un projet de Minrail de plus de 7 M$*. https://www.economie.gouv.qc.ca/ministere/salle-de-presse/communiques-de-presse/communique-de-presse/?no_cache=1&tx_ttnews%5Btt_news%5D=24335&cHash=177a0f5904b8e38552408acaf56bbee1

Mine Raglan. (2019). *Mine Raglan : Livret Engagement.* https://www.mineraglan.ca/fr/media/publications/LivretEngagement/notre-engagement_2019_FR.pdf

Mining Journal. (2019). *The workplace of the future—Global leadership report.* https://www.mining-journal.com/digital_assets/3b7a0a13-0175-49f1-8e16-739f82df95df/GLR_2019_Excerpt_Sep_02_MJ.pdf

NEO UQTR. (2019). *Le Centre national intégré du manufacturier intelligent devient réalité.* https://neo.uqtr.ca/2019/10/25/le-centre-national-integre-du-manufacturier-intelligent-devient-realite/

Northern Ontario Business. (2019). *Vale's digital evolution takes shape.* https://www.northernontariobusiness.com/industry-news/mining/vales-digital-evolution-takes-shape-1701901

OpenPR. (2019). *Artificial Intelligence in Cyber Security Market 2019-2027 Study includes Top Key Players as Amazon, Cylance, Darktrace, IBM, Intel Corporation, Micron Technology, NVIDIA, Samsung, Vectra AI.* https://www.openpr.com/news/1834750/artificial-intelligence-in-cyber-security-market-2019-2027

Penn State University. (2019). *Center for Immersive Experiences set to debut, serving researchers and students.* https://news.psu.edu/story/593942/2019/10/22/research/center-immersive-experiences-set-debut-serving-researchers-and

Perspectives Collèges et Instituts Canada. (2019). *L'intelligence artificielle et l'avenir de l'apprentissage.* https://www.collegesinstitutes.ca/fr/centre-des-nouvelles/perspective/perspectives-le-30-septembre/

PwC. (2020). *La main-d'œuvre de l'avenir.* https://www.pwc.com/ca/fr/services/consulting/digital-iq/workforce-of-the-future.html

QuébecInnove. (2019). *Grand sondage sur l'innovation et les PME.* https://www.quebecinnove.com/sondage

Rudrajit Mitra, Bekir Genc. (2019). *An example of a University-Industry collaboration to undertake focused research.* 30th SOMP Annual Meeting and Conference, TH Georg Agricola University in Bochum-Germany. https://mining-report.de/wp-content/uploads/_pda/2019/12/MRG_1906_University_Industry_Collaboration_Peer_Review_191210.pdf

Russell A. Carter. (2019). Interoperability : Essential for Building the Mine of the Future. *Engineering and Mining Journal.* https://www.e-mj.com/features/interoperability-essential-for-building-the-mine-of-the-future/

safran-group.com. (2019). *MINES ParisTech annonce le lancement de la Chaire BIGMECA.* https://www.safran-group.com/fr/media/mines-paristech-annonce-le-lancement-de-la-chaire-bigmeca-20191211

Techwire Asia. (2019). *Mining companies to benefit from investing in digital solutions in 2020.* https://techwireasia.com/2019/12/mining-companies-to-benefit-from-investing-in-digital-solutions-in-2020/

The Educator Australia. (2019). *Government funds six new research centres.* https://www.theeducatoronline.com/he/news/government-funds-six-new-research-centres/267304

The Future Economy. (2019). *A Digital Transformation Roadmap for Quebec's SMEs.* https://thefutureeconomy.ca/spotlights/quebec-digital-transformation/pierre-fitzgibbon/

Thomas Calvi. (2020). *Le Québec accorde 3 M$ pour la création du Pôle d'expertise régionale en intelligence artificielle piloté par l'Institut intelligence et données. Actu IA.* https://www.actuia.com/actualite/le-quebec-accorde-3m-pour-la-creation-du-pole-dexpertise-regionale-en-intelligence-artificielle-pilote-par-linstitut-intelligence-et-donnees/

TimminsToday.com. (2019). *Robotics stepping up safety in underground mine inspections.* https://www.timminstoday.com/local-news/robotics-stepping-up-safety-in-underground-mine-inspections-4-photos-1827274

Tracey Lall. (2020). *Will Peak AI in the Workplace Be a Blessing for Employees?* HR Technologist. https://www.hrtechnologist.com/articles/ai-in-hr/will-peak-ai-in-the-workplace-be-a-blessing-for-employees/

Université de Sherbrooke. (2020). *Développement de procédés microélectroniques innovants. L'Université de Sherbrooke et l'usine IBM de Bromont renouvellent leur partenariat.* https://www.usherbrooke.ca/relations-medias/communiques/communiques-details/c/42036/

Université d'Ottawa. (2019). *IBM Canada et l'Université d'Ottawa lancent un pôle de cybersécurité.* https://medias.uottawa.ca/nouvelles/ibm-canada-luniversite-dottawa-lancent-pole-cybersecurite

Université du Québec à Rimouski. (2019). *Nouvelle manière d'intégrer la technologie dans l'enseignement des sciences au primaire.* https://www.uquebec.ca/reseau/fr/medias/actualites-du-reseau/nouvelle-maniere-dintegrer-la-technologie-dans-lenseignement-des-sciences-au-primaire

Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue. (2019). *Unique au monde, le programme de recherche UQAT-Polytechnique en environnement minier est renouvelé jusqu'en 2026.* https://www.uqat.ca/nouvelles-et-evenements/nouvelle/?id=1412

UP Magazine. (2019). *Sciences prédictives pour l'industrie du futur : MINES ParisTech à la pointe.* https://up-magazine.info/index.php/technologies-a-la-pointe/lab/8784-sciences-predictives-pour-l-industrie-du-futur-mines-paristech-a-la-pointe/

Valerie Bolden-Barrett. (2019). *Cybersecurity workforce must grow 145% to close talent gap.* https://www.hrdive.com/news/cybersecurity-workforce-must-grow-145-to-close-talent-gap/566905/

Vanessa Ngono Atangana. (2020). *La BAD finance un programme de formation pour les décideurs politiques du secteur minier de 2020 à 2022.* Agence Ecofin. https://www.agenceecofin.com/mines/1601-72870-la-bad-finance-un-programme-de-formation-pour-les-decideurs-politiques-du-secteur-minier-de-2020-a-2022

World Economic Forum. (2019). *Towards a Reskilling Revolution : Industry-Led Action for the Future of Work.* http://www3.weforum.org/docs/WEF_Towards_a_Reskilling_Revolution.pdf

125, rue Self
Val-d'Or (Québec) J9P 3N2

819 825-4667
www.inmq.gouv.qc.ca

Institut national des mines
Québec