

Input du cep

No 3 | 202321

février 2023

La baguette de sourcier : Comment l'IA contribue à un approvisionnement plus résilient en matières premières

Anselm Küsters, André Wolf



La transformation de l'Europe en une économie numérisée et durable nécessite un approvisionnement sûr en métaux rares tels que le lithium et le cobalt. La diversification des sources d'approvisionnement est à l'ordre du jour. Cependant, les informations sur les nouveaux gisements de matières premières sont encore guidées par le hasard et parcellaires. Cet Input du cep soutient que l'utilisation de l'IA dans la reconnaissance et la surveillance améliorera la base d'informations et devrait donc être encouragée.

- ▶ L'utilisation de l'IA dans l'exploration des ressources **augmente considérablement la rentabilité et la vitesse de recherche et peut réduire les coûts sociaux consécutifs de l'exploitation minière.**
- ▶ La **promotion des technologies d'exploration basées sur l'IA** devrait donc être une composante essentielle de la future loi sur les matières premières critiques de l'UE. Dans le même temps, la **réglementation de l'UE en matière de données** doit garantir que des données de haute qualité sont utilisées pour la formation des systèmes sous-jacents, et que les effets d'interdépendance sont surveillés par des « humains dans la boucle ».
- ▶ Dans l'intérêt de la durabilité, les algorithmes devraient également évaluer les **informations sur les effets environnementaux probables** de l'exploitation commerciale. En outre, les technologies financées devraient être utilisées pour **construire une économie du recyclage des métaux critiques** en Europe.

Table des matières

1	Motivation	3
2	Déficits d'information concernant les dépôts de matières premières	4
2.1	Dépôts géologiques	4
2.2	Mines urbaines	5
3	Contribution possible de l'IA	6
3.1	Potentiel technique	6
3.2	Exemples pratiques	8
3.3	Problèmes et limites.....	11
4	Promouvoir A I dans le contexte de la politique européenne des matières premières	18
4.1	Prise en compte dans la stratégie de l'UE en matière de matières premières	18
4.2	Justifier l'éligibilité au financement	19
5	Recommandations pour l'action de l'UE	20
6	Conclusion	24

1 Motivation

Sous la surface de la terre se trouvent une multitude de ressources minérales, dont beaucoup pourraient être utiles à l'avenir. Certains minéraux n'ont été exploités qu'en petites quantités dans le passé mais deviennent de plus en plus cruciaux à l'avenir. Il s'agit notamment des métaux rares nécessaires à la production de batteries (lithium, cobalt), d'éoliennes (terres rares) et d'écrans électroniques (indium). Ces minéraux sont indispensables à la transformation de l'Europe en une économie numérisée et durable. Or, à l'heure actuelle, l'extraction et la fusion sont concentrées dans quelques pays non membres de l'UE, comme la Chine, l'Australie et l'Afrique du Sud. L'approvisionnement de ces minéraux est donc soumis à de multiples risques en matière d'évolution des prix, de sécurité d'approvisionnement et d'impact environnemental.¹ Cette structure d'approvisionnement crée également des dépendances stratégiques pour l'Europe, qui doivent être évaluées de manière critique dans le contexte géopolitique actuel.

L'une des solutions possibles consiste à explorer de nouveaux gisements de matières premières à l'intérieur ou à l'extérieur de l'UE. Toutefois, jusqu'à présent, les activités d'exploration ont également connu une nette fracture mondiale : Le Canada, l'Australie, les États-Unis et la Chine sont perçus comme les régions les plus critiques en raison de leur taille et de leur importance pour l'industrie minière, plus de la moitié du budget mondial d'exploration des métaux en 2021 étant affecté à ces régions.² Jusqu'à présent, en termes de volume, l'Europe n'a pas joué un rôle significatif dans les évaluations régionales et n'est même pas enregistrée séparément en tant que région dans les analyses disponibles. Bien qu'il y ait eu récemment des découvertes isolées à grande échelle en Europe, en Suède³ et en Norvège⁴, elles n'ont pas encore été soutenues par une stratégie d'exploration systématique. L'évolution récente des prix a encore freiné l'incitation : Les prix des métaux comparativement bas de ces dernières années, qui ont atteint leur niveau le plus bas en 2016, ont provoqué l'assèchement des marchés de capitaux pour les métaux et ont forcé les entreprises à se concentrer sur des travaux plus sûrs mais moins gratifiants à proximité des mines existantes. Le déclin des découvertes qui en résulte est devenu une menace de plus en plus aiguë pour la sécurité de l'approvisionnement face à l'envolée de la demande de métaux pour batteries tels que le lithium et le cobalt.

L'un des moyens d'augmenter le rendement pourrait être de se concentrer davantage sur l'exploration dite « greenfield », c'est-à-dire l'exploration de terrains géologiques jusqu'alors largement inexplorés, loin des gisements connus.⁵ Cependant, le niveau élevé d'incertitude concernant les résultats des méthodes d'exploration conventionnelles - combiné à des dépenses d'investissement considérables - représente un obstacle majeur à l'incitation. De meilleures méthodes d'analyse sont donc nécessaires pour pouvoir évaluer à l'avance les chances de succès d'une exploration. La question se pose donc de savoir si les processus d'exploration et d'exploitation peuvent être optimisés à l'aide des dernières

¹ Wolf, A. (2022). Le traitement par l'Europe des matières premières du futur. cepInput No.11/2022.

² S&P Global Market Intelligence (2022). Tendances mondiales en matière d'exploration. Édition spéciale de l'ACPE, avril 2022, p. 13.

³ CNBC (2023). La [Suède découvre le plus grand gisement de métaux de terres rares d'Europe, qui pourrait devenir « plus important que le pétrole et le gaz »](#).

⁴ CNN (2023). La [Norvège découvre un immense gisement de métaux, de minéraux et de terres rares dans ses fonds marins](#).

⁵ S&P Global Market Intelligence (2022). Tendances mondiales en matière d'exploration. Édition spéciale de l'ACPE, avril 2022, p. 13.

méthodes d'intelligence artificielle (IA), qui ont déjà révolutionné de nombreux autres secteurs, tels que la mobilité et le commerce électronique.⁶

Cet **Input du cep** analyse le potentiel et les exigences de l'utilisation de l'IA dans l'exploration et la surveillance des gisements de métaux critiques. La section 2 examine les déficits d'information actuels concernant l'existence de ressources et de réserves, tant au niveau des gisements géologiques que de la richesse des ressources contenues dans les produits finis qui sont actuellement en sommeil. La section 3 décrit en détail comment les nouvelles approches d'IA pourraient rendre la découverte et l'extraction de minéraux critiques plus efficaces à l'avenir et fournit plusieurs exemples concrets de la scène des start-up non européennes dont l'expérience précieuse devrait maintenant être transférée en Europe. Dans le même temps, cette section met également en évidence les impondérables techniques et réglementaires qui subsistent actuellement et analyse ensuite, d'un point de vue économique, dans quelle mesure les méthodes basées sur l'IA devraient pouvoir bénéficier d'un soutien. La section 4 aborde le rôle de l'IA dans la politique européenne des matières premières jusqu'à présent et justifie son éligibilité à un soutien. Sur cette base, dans la section 5, nous concluons en formulant quelques recommandations politiques concrètes à l'intention de la Commission européenne (UE), qui pourraient contribuer à faire en sorte que le continent ne rate pas le passage à l'exploitation minière et à l'exploration pilotées par des machines. La section 6 présente un résumé des principales conclusions.

2 Défis d'information concernant les dépôts de matières premières

2.1 Dépôts géologiques

Les données primaires accessibles au public sur la répartition géographique des gisements de matières premières sont principalement fournies par les autorités statistiques nationales. Cependant, les critères d'enregistrement et les démarcations ne sont pas normalisés au niveau international. L'U.S Geological Survey (USGS) s'est imposé comme une source de comparaison entre les pays, intégrant les informations des autorités d'autres pays ainsi que les résultats de ses propres recherches provenant de sources non officielles. L'USGS fait la distinction entre les réserves et les ressources. Les réserves sont définies par l'USGS comme des gisements identifiés qui peuvent être extraits de manière économique dans les conditions actuelles. Les ressources comprennent également les gisements identifiés qui ne sont pas actuellement économiques et les gisements dont on suppose l'existence sur la base d'indicateurs géologiques.⁷ L'étendue actuelle des réserves de matières premières d'un pays dépend donc non seulement de la disponibilité physique des gisements, mais aussi de l'état du développement technique et de la situation des prix sur les marchés des matières premières. Le stock total de ressources est également sujet à d'importantes fluctuations dues aux activités d'exploration ainsi qu'à la correction des estimations. Les sources d'information relatives aux gisements de matières

⁶ Desharnais, G., Paiement, J.P., Hatfield, D. et Poupard, N. (2017). Exploitation des BIG Data : l'avenir du ciblage de l'exploration grâce à l'apprentissage automatique. [Document de conférence octobre 2017](#).

⁷ USGS (2020). Annexes - Sommaires des produits minéraux 2020. [US Geological Survey](#).

premières dans la zone de l'UE sont également disparates et parfois incohérentes.⁸ Cela vaut également pour les gisements situés dans les zones marines que les États membres ont le droit d'explorer.⁹

Traditionnellement, les géologues recherchent des gisements de minéraux en collectant minutieusement des données sur le terrain, puis en les analysant à la main. Les méthodes conventionnelles reposent donc exclusivement sur l'interprétation humaine, mais elles échouent aussi souvent. Bien que des milliards de dollars soient investis dans l'exploration, seule une poignée de nouveaux gisements sont découverts chaque année : Les mineurs affirment couramment que seul un puits d'exploration sur une centaine met en évidence quelque chose.¹⁰ Le nombre de découvertes est déjà en baisse depuis le début du millénaire.¹¹ Le manque d'investissement dans de nouvelles mines indique également que l'approche conventionnelle ne pourra pas faire face à la demande qui prolifère ces dernières années, notamment en raison de la nécessité d'une transformation climatiquement neutre de l'économie mondiale. Le prix indexé des métaux est désormais revenu au-dessus de son pic de 2012, et les budgets d'exploration ont augmenté de 35 %, passant de 8,35 milliards de dollars en 2020 à 11,24 milliards de dollars en 2021. Néanmoins, le budget d'exploration mondial de 2021 ne représente que 50 % du pic de 2012.¹² De manière significative, la part de l'exploration greenfield dans le budget total est proche d'un niveau record à 26 %, contre 41 % en 2007.¹³ Le taux d'erreur élevé et les faibles chances de réussite des forages, face à une demande croissante et à des fonds insuffisants, signifient que des méthodes d'exploration plus efficaces peuvent - et doivent - jouer un rôle essentiel à l'avenir si la communauté mondiale veut atteindre ses objectifs ambitieux en matière de climat et de numérisation.

2.2 Mines urbaines

Les problèmes liés à l'exploitation des futures matières premières ont attiré l'attention sur les sources alternatives. Avec l'augmentation de l'utilisation industrielle, la richesse des matières premières dormant dans les produits quotidiens devient de plus en plus attrayante. Le terme « urban mining » décrit les stratégies visant à rendre ce trésor économiquement viable grâce à la gestion et au retraitement des déchets. Les avantages de ces gisements de matières premières dites « anthropiques » sont évidents. Ils peuvent être exploités sans les risques environnementaux liés à l'exploitation minière et sont indépendants des fluctuations de prix et des risques d'approvisionnement sur les

⁸ Lewicka, E., Guzik, K., & Galos, K. (2021). Sur les possibilités de production de matières premières critiques à partir des sources primaires de l'UE. *Ressources*, 10(5), S. 50.

⁹ Lusty, P. A., & Murton, B. J. (2018). Les gisements minéraux des océans profonds : ressources en métaux et fenêtres sur les processus terrestres. *Éléments : Une revue internationale de minéralogie, géochimie et pétrologie*, 14(5), 301-306.

¹⁰ Beiser, V. (2022). [Ces algorithmes sont à la recherche d'un filon mère pour les batteries des véhicules électriques](#). WIRED (12.12.2022).

¹¹ Pour les chiffres, voir : Davies, S. (2020). Évaluation des méthodologies pour prédire la dotation minérale potentielle lors de l'entrée dans un espace d'exploration immature, en utilisant le district aurifère gréseux orogénique d'Australie occidentale comme laboratoire naturel. Thèse de doctorat, The University of Western Australia.

¹² S&P Global Market Intelligence (2022). Tendances mondiales en matière d'exploration. Édition spéciale de l'ACPE, avril 2022, p. 5.

¹³ S&P Global Market Intelligence (2022). Tendances mondiales en matière d'exploration. Édition spéciale de l'ACPE, avril 2022, p. 12.

marchés mondiaux.¹⁴ De plus, les gisements anthropiques sont concentrés dans les zones urbaines et donc principalement à proximité des installations de production. La dépendance de l'UE à l'égard d'un petit nombre de pays producteurs serait donc réduite par une augmentation de l'exploitation minière dans les villes.

Dans le même temps, cependant, la mise en place des chaînes de recyclage nécessaires représente un défi technique et organisationnel important. Comme dans l'exploitation minière classique, il faut d'abord avoir une vue d'ensemble de la taille des gisements existants. Ceci est particulièrement difficile pour les matières premières futures, qui sont souvent fixées à l'intérieur de biens de consommation durables tels que les téléphones portables. Étant donné qu'une grande partie du cycle de vie se déroule dans le domaine de la consommation, les flux de matières et les changements dans les stocks locaux sont difficiles à estimer. Les changements constants de l'intensité matérielle dus à des cycles d'innovation courts compliquent encore l'évaluation.¹⁵ Dans toute l'Europe, cependant, les volumes sont assez importants. La *plateforme Urban Mine a* effectué des calculs à cet effet en 2018. Elle estime par exemple la quantité de lithium dans les batteries européennes à environ 13 000 tonnes et la quantité de cobalt à 24 000 tonnes.¹⁶ Cependant, le projet associé est désormais terminé et les données ne sont plus mises à jour. Pour évaluer le potentiel et la gestion efficace des matières premières secondaires, il faudrait des estimations actualisées en permanence avec la plus haute résolution géographique possible. Cela s'applique encore plus aux méthodes d'évaluation de l'IA présentées ci-dessous.

3 Contribution possible de l'IA

3.1 Potentiel technique

La science des données et l'apprentissage automatique pourraient considérablement améliorer la recherche de sites d'excavation lucratifs à l'avenir. Diverses équipes de recherche et start-ups exploratoires développent actuellement des projections de *big data* s'appuyant sur la géophysique et les forages pour réduire les incertitudes existantes sur le potentiel des ressources dans de nombreuses régions du monde. Lors de l'évaluation des ressources géologiques, des facteurs contradictoires doivent être évalués pour créer un modèle de décision fonctionnel. L'utilisation de logiciels pilotés par l'IA dans ce contexte pourrait accélérer la découverte de nouveaux minerais et, dans le même temps, réduire les coûts. Les premiers cas pratiques concernant les champs pétrolifères, les systèmes géothermiques, les sites contaminés et la recharge des nappes phréatiques existent déjà et donnent un aperçu de l'avenir.¹⁷ Par exemple, des méthodes d'estimation basées sur les données ont récemment été utilisées pour évaluer la ceinture de roches vertes Sandstone en Australie occidentale ; les gisements d'or non découverts prévus peuvent désormais être utilisés pour orienter les futures

¹⁴ Tercero, L., Rostek, L., Loibl, A. et Stijepic, D. (2020). Les promesses et les limites de l'extraction minière urbaine. Institut Fraunhofer de recherche sur les systèmes et l'innovation ISI.

¹⁵ Agence fédérale pour l'environnement (2022). [Mines urbaines](#).

¹⁶ Plateforme des mines urbaines (2018). Composition des batteries.

¹⁷ Scheidt, C., Li, L. & Caers, J.K. (eds) (2018). Quantifier l'incertitude dans les systèmes de subsurface. Hoboken, NJ, USA : Wiley. Pour un résumé concis, voir également : Caers, J.K. (2018). [Quantifier l'incertitude sur les ressources de la Terre](#). Eos (99).

dépenses d'exploration.¹⁸ En décembre 2022, le magazine technologique Wired a promis le lancement prochain d'un « mariage de l'intelligence artificielle de pointe avec l'une des plus anciennes industries de l'humanité ».¹⁹

L'élément de base d'une telle connexion entre l'IA et l'exploitation minière est l'existence de données lisibles par machine. De nombreuses sociétés minières ou d'exploration disposent de grandes quantités de données historiques qui cachent des preuves de l'existence de systèmes minéralisés. Malheureusement, la plupart de ces données sont dans un état analogique, souvent mal conservé, et leur numérisation et leur validation nécessitent des investissements importants. Des informations importantes pour une évaluation des ressources pilotée par l'IA sont contenues, notamment sur des cartes géologiques et dans des rapports de terrain. L'extraction d'informations précieuses et précises de ces cartes est un processus long et laborieux qui nécessite beaucoup de travail humain. L'expérience américaine montre qu'il faut environ deux ans pour produire une évaluation typique d'un minéral critique basée sur des données.²⁰ Cela s'explique par le fait que seuls 10 % environ des cartes géologiques sont disponibles sous forme d'images géoréférencées et que, par ailleurs, seule la moitié d'entre elles sont des fichiers vectoriels entièrement numérisés nécessaires à l'analyse (le reste étant généralement des images scannées de cartes papier).

En raison de ces problèmes, les chercheurs et les entreprises se tournent de plus en plus vers d'autres sources de données, plus faciles à obtenir et permettant de fournir des prévisions d'exploration pertinentes. La norme actuelle en matière d'exploration implique généralement une exposition directe par le biais du forage ainsi qu'une exposition indirecte par le biais de sondages. Des avancées technologiques cruciales ont été réalisées récemment, notamment dans le domaine des levés géophysiques et de l'analyse hyperspectrale des carottes de forage, qui améliorent considérablement les possibilités technologiques de stockage et de traitement de données riches.²¹ Des instruments de mesure tels que les gravimètres, les capteurs d'ondes gravitationnelles et les magnétomètres sont utilisés pour détecter et enregistrer les fluctuations des champs gravitationnels et magnétiques. Les données ainsi recueillies peuvent ensuite être examinées pour identifier des gisements de ressources potentiellement précieux, par exemple en analysant la densité spectrale et la localisation temps-fréquence d'un signal.

Enfin, au cours des dix dernières années, il est devenu possible de faire passer ces données unidimensionnelles ou bidimensionnelles dans le domaine du 3D. Depuis 1999, **MiraGeoscience est un pionnier** dans l'application de la modélisation géologique avancée, de la technologie SIG 3D et de la gestion de données multidisciplinaires 4D dans l'industrie minière avec le modèle commun de la Terre intégré.²² La société fournit à l'industrie minière des solutions de modélisation et de gestion des données pour l'exploration minière et l'évaluation des risques géotechniques. C'est important car,

¹⁸ Davies, S. (2020). Évaluation des méthodologies pour prédire la dotation minérale potentielle lors de l'entrée dans un espace d'exploration immature, en utilisant le district aurifère gréseux orogénique d'Australie occidentale comme laboratoire naturel. Thèse de doctorat, The University of Western Australia.

¹⁹ Beiser, V. (2022). [Ces algorithmes sont à la recherche d'un filon mère pour les batteries des véhicules électriques](#). WIRED (12.12.2022).

²⁰ DARPA (2022). La [DARPA annonce les gagnants du concours AI](#) for Critical Mineral Assessment (16 déc. 2022).

²¹ Desharnais, G., Paiement, J.P., Hatfield, D. et Poupart, N. (2017). Exploitation des BIG Data : l'avenir du ciblage de l'exploration grâce à l'apprentissage automatique. [Document de conférence octobre](#) 2017.

²² Mira Geoscience (2023). [À propos de nous](#).

pour que les systèmes d'IA puissent prédire où se trouvent les cibles les plus prometteuses, ils ont besoin de données qui peuvent être stockées dans un espace 3D représentant la zone cubique dans laquelle les cibles doivent être évaluées.²³ Les startups et les sociétés minières utilisent désormais de plus en plus les méthodes d'IA pour analyser efficacement ces ensembles de données et modèles 3D combinés. L'espoir est que l'algorithme puisse détecter des corrélations significatives qui ne seraient pas apparentes pour un humain. Nous donnons ci-dessous quelques exemples intéressants issus de ce nouveau développement.

3.2 Exemples pratiques

L'acteur le plus prometteur dans le domaine émergent de l'IA et de l'exploitation minière est **KoBold Metals**, une start-up de quatre ans qui, en collaboration avec l'université de Stanford et avec le soutien de Bill Gates et Jeff Bezos, a développé et maintenant déployé avec succès un système basé sur l'IA pour trouver des gisements minéraux potentiels. Selon les rapports, l'approche de KoBold repose sur une base de données qui rassemble des informations sur la croûte terrestre à partir de rapports géologiques, d'échantillons de sol, d'images satellites, de documents de recherche universitaires et de rapports de terrain manuscrits.²⁴ Ces informations - qui représentent environ 30 millions de pages - sont numérisées et normalisées à l'aide de la « reconnaissance optique des caractères » pour permettre à l'IA d'identifier des modèles géologiques et d'autres caractéristiques des lieux où des métaux ont été trouvés dans le passé. Les algorithmes ainsi formés seront capables de trouver des endroits prometteurs présentant des schémas similaires qui n'ont pas encore été explorés, et de produire des cartes virtuelles indiquant où les métaux cibles sont susceptibles d'être trouvés. KoBold utilise cette technologie principalement pour rechercher du cuivre, du cobalt, du nickel, du lithium et des terres rares. Le fonctionnement de l'apprentissage supervisé sous-jacent du système d'IA est examiné et expliqué plus en détail à la section 3.3.

Pour donner un exemple concret : Dans les régions reculées du Québec, KoBold Metals utilise, entre autres, un hélicoptère avec une bobine de cuivre de 35 mètres de large suspendue à son ventre,²⁵ qui envoie des ondes électromagnétiques dans la terre générant des courants dans la roche. Des conducteurs électriques renvoient des signaux à la bobine réceptrice, indiquant si la roche balayée pourrait contenir de précieux gisements de nickel et de cobalt. L'hélicoptère parcourt environ 160 kilomètres par jour et transmet les données aux scientifiques de KoBold par satellite. Ceux-ci saisissent les nouvelles données de sondage directement dans leur base de données, les combinent avec les observations existantes et mettent à jour leurs modèles d'IA afin de pouvoir modéliser plus efficacement la géologie de la région étudiée. Ainsi, à l'aide d'un logiciel piloté par l'IA, les plans de levés aériens peuvent être ajustés quotidiennement et accélérer l'identification des endroits prometteurs à forer. KoBold affirme que l'utilisation de ces technologies peut multiplier par 20 le taux de découverte habituel.

²³ Desharnais, G., Paiement, J.P., Hatfield, D. et Poupart, N. (2017). Exploitation des BIG Data : l'avenir du ciblage de l'exploration grâce à l'apprentissage automatique. [Document de conférence octobre 2017](#), p. 4.

²⁴ Beiser, V. (2022). Ces [algorithmes sont à la recherche d'un filon mère pour les batteries des véhicules électriques](#). WIRED (12.12.2022).

²⁵ Stone, M. (2021). [The big tech quest to find the metals needed for the energy overhaul](#). MIT Technology Review (11.08.2021).

Comme mentionné ci-dessus, KoBold a récemment établi un partenariat avec le **Stanford Center for Earth Resources Forecasting** (SCERF), dont l'expertise méthodologique a été utilisée pour créer un « agent de décision » IA capable de générer un plan d'exploration. Ce décideur numérique quantifie l'incertitude des résultats du modèle de KoBold et, sur cette base, conçoit un plan de collecte de données pour réduire cette incertitude de manière séquentielle. Le SCERF mène des recherches dans le domaine de l'exploration, de l'évaluation et du développement des ressources terrestres, qu'il s'agisse d'énergie, d'eau ou de minéraux, et développe des solutions allant de l'acquisition de données à l'analyse décisionnelle.²⁶ Il se concentre sur l'intégration des données spatiales, la quantification de l'incertitude des systèmes géologiques et la valeur ajoutée des sources de données pour la prise de décision. Un coup d'œil aux résultats de la recherche du Centre montre où se situent actuellement le potentiel et les problèmes de cette technologie.

La quantification des incertitudes est l'élément unificateur de la recherche du SCERF, ce qui n'est pas surprenant puisqu'il s'agit du principal enjeu de l'évaluation prédictive des gisements. Lors de l'exploitation des ressources géologiques, il faut décider où et comment les extraire, quand arrêter l'extraction et quels sont les impacts environnementaux de l'extraction.²⁷ Ceci est vrai pour tous les métaux rares mentionnés dans l'introduction, donc ces questions sont également du plus haut intérêt pour tout effort européen dans le domaine (voir section 4). Comme le montrent les chercheurs du SCERF dans divers domaines d'application, l'analyse assistée par ordinateur aide à ce type de prise de décision car elle peut proposer des mesures concrètes dans des conditions d'incertitude, sur la base de données d'observation spécifiques et d'une compréhension globale de base des systèmes de subsurface - sans toutefois pouvoir prédire entièrement leur résultat. Si les systèmes d'IA peuvent ainsi contribuer à optimiser l'exploration, l'évaluation et l'extraction des ressources minérales, de nombreuses régions minières européennes pourraient en bénéficier. L'énergie géothermique, comme celle qui est largement utilisée en Islande pour produire de l'électricité et chauffer les bâtiments, est l'une de ces ressources souterraines où la quantification de l'incertitude pourrait faciliter la prise de décision.

Un exemple de progrès récent dans la quantification de l'incertitude dans le secteur minier est la recherche de David Zhen Yin, qui participe au SCERF en tant que directeur de programme de la Stanford Mineral X Initiative, où il dirige des recherches sur le développement durable des minéraux critiques pour la transition énergétique.²⁸ Basée sur ce qu'on appelle l'apprentissage probant bayésien (BEL),²⁹ qui utilise l'apprentissage automatique pour trouver une relation directe entre le prédicteur et la cible, sa recherche vise à développer un cadre automatisé pour quantifier les incertitudes dans les modèles géologiques pour l'évaluation des gisements. Lorsque de nouveaux forages sont « coulés » (c'est-à-dire que des cavités verticales sont créées pour l'extraction), de multiples composantes du

²⁶ L'analyse suivante se réfère à [une évaluation de tous les projets SCERF](#) que l'on peut trouver sur cette page : SCERF (2023). Recherche.

²⁷ Caers, J.K. (2018). [Quantifier l'incertitude sur les ressources de la Terre](#). Eos (99).

²⁸ Yin (non daté). [Quantification automatisée de l'incertitude d'un modèle géologique à l'aide de l'apprentissage bayésien probant. SCERF](#).

²⁹ Cette approche fait référence à Bayes et à sa notion d'« incertitude préalable », qui rend compte de ce que nous savons déjà de l'inconnu avant d'acquérir des données. Ainsi, avant même que des gisements spécifiques ne soient exploités, nous en savons déjà beaucoup sur le sous-sol, car un système de dépôt géologique présente de nombreuses analogies avec d'autres parties de la terre. L'approche bayésienne nécessite une quantification de ces informations géologiques existantes.

modèle géologique doivent être mises à jour conjointement et automatiquement. Le fonçage est l'une des opérations minières les plus risquées et représente un défi considérable pour l'ingénieur employé.³⁰ Pendant la mise à jour, le système piloté par l'IA développé par Yin étend la prévision directe pour effectuer une réduction automatique de l'incertitude du modèle en évaluant les nouvelles observations des puits. En d'autres termes, l'analyse géologique devient immédiatement moins sujette aux erreurs sans qu'il soit nécessaire de reconstruire un modèle classique, ce qui réduit considérablement le temps nécessaire et, dans le même temps, minimise les risques liés à l'environnement.

Le programme SCERF est financé par des membres industriels des secteurs des minéraux et de l'énergie, ainsi que par des agences gouvernementales et la Stanford Doerr School of Sustainability in Groundwater and Geothermal Resources. Les collaborations actuelles du SCERF avec les entreprises portent sur la gestion des eaux souterraines au Danemark, la planification de la production d'un réservoir complexe en Libye, l'évaluation d'un réservoir turbiditique en eau profonde en Afrique de l'Ouest à l'aide de données sismiques, l'assainissement de la contamination par l'uranium aux États-Unis, l'analyse prédictive du Big Data pour l'optimisation des gisements de schiste, la prédiction automatisée des données dans l'évaluation des ressources minérales et l'utilisation du BEL pour la gestion des réservoirs de gaz.³¹ Comme l'indique cette liste, les modélisations précédentes de la topographie du sol ont principalement eu lieu dans la zone non européenne, plus particulièrement en Antarctique, au Canada, en Chine et aux États-Unis, ainsi que dans le Golfe du Mexique. D'un point de vue européen, il convient donc de souligner que le programme SCERF a également examiné les données géophysiques dans le système aquifère danois, dans un document de recherche de Lijing Wang sur la quantification de l'incertitude sur l'écoulement et le transport du nitrate.³² En termes de contenu, il s'agit essentiellement de la gestion des résidus d'engrais plutôt que des terres rares, mais d'un point de vue méthodologique, il est intéressant de noter que l'analyse a également pu s'appuyer sur des données de haute qualité dans ce contexte européen, notamment des informations hydrologiques et géochimiques sur la distribution des nitrates ainsi que des données dites tTEM. Le système tTEM est un système électromagnétique conçu pour la cartographie géophysique et géologique 3D détaillée, mais rapide et rentable, du sous-sol peu profond.³³

Outre la coopération entre KoBold et l'université de Stanford, une poignée d'autres startups travaillent dans ce domaine. **EarthAI** est une start-up australienne qui utilise également des méthodes d'IA pour trouver des gisements potentiels de matières premières.³⁴ L'entreprise se décrit comme une « société d'exploration des métaux verticalement intégrée », spécialisée dans les gisements de minerais métalliques nécessaires à la construction d'infrastructures d'énergie renouvelable. Jusqu'à présent, elle affirme avoir testé 135 cibles générées par l'IA sur des terrains jusque-là inexplorés et avoir découvert 35 gisements. Cela représente un taux de réussite de 26 %, c'est-à-dire nettement plus élevé que pour le processus conventionnel décrit ci-dessus. Après avoir découvert des gisements pertinents, EarthAI conclut des collaborations avec des développeurs pour mettre ces gisements en production (contrairement à KoBold, qui se charge lui-même du développement, ce qui augmente le risque

³⁰ Le fonçage est la construction de [cavités verticales telles que des puits ou des cavités pour l'extraction de gisements](#).

³¹ SCERF (2023). Recherche.

³² Wang, L. (non daté). [Quantification de l'incertitude sur l'écoulement et le transport du nitrate](#) à l'aide de données géophysiques dans le système aquifère danois. SCERF.

³³ Groupe [HydroGéophysique](#) (non daté). tTEM.

³⁴ Consultez le profil de l'entreprise à l'adresse [suivante](#)

entrepreneurial). Les projets sont actuellement menés en Australie (Territoire du Nord et Nouvelle-Galles du Sud) et se concentrent sur les métaux pour batteries (nickel, cobalt, vanadium, chrome), les métaux pour l'électronique (or, argent, platine, palladium), les métaux pour l'électricité (cuivre, zinc, plomb, manganèse) et les métaux pour générateurs (terres rares, étain, tungstène, molybdène, tantale, niobium).

Afin d'étendre la souveraineté européenne dans le domaine des minéraux critiques, d'autres initiatives complémentaires sont nécessaires qui concernent d'autres parties de la chaîne de valeur que l'exploration des gisements existants, mais qui peuvent également bénéficier des méthodes d'apprentissage automatique. Par exemple, les scientifiques ont récemment trouvé un nouveau moyen piloté par l'IA pour faciliter la recherche de nouveaux composés de terres rares. Ici aussi, l'algorithme examine une base de données d'informations (dans ce cas, relatives aux composés de terres rares) et reconnaît les corrélations qui permettent de trouver de nouveaux composés potentiels. Comme il est impossible de tester théoriquement ou expérimentalement tous les composés possibles, les scientifiques ont construit un modèle d'IA capable de tester rapidement des centaines de permutations, puis d'évaluer la stabilité de phase de chaque composé. En d'autres termes, l'IA peut juger si un composé de terre rare va se désagréger ou non. Si l'Europe veut atteindre une souveraineté stratégique dans le domaine des métaux critiques et, en même temps, ses objectifs ambitieux de transformation écologique de l'économie, une telle pensée créative et une approche globale de la promotion de systèmes d'IA appropriés sont nécessaires de toute urgence.

3.3 Problèmes et limites

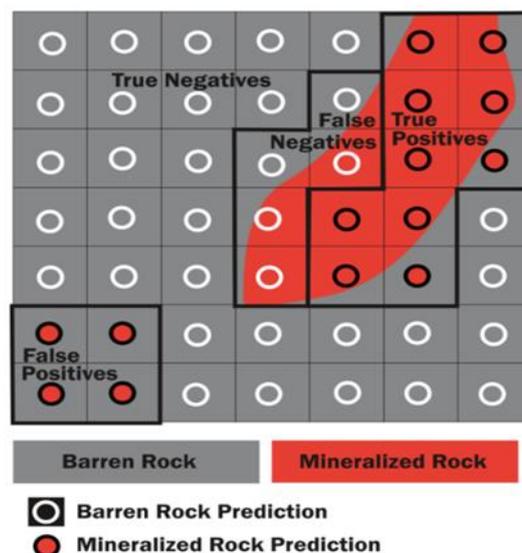
Bien que cet **Input du cep** affirme que l'utilisation de systèmes d'IA dans l'exploration et la surveillance, tels que ceux actuellement développés par des entreprises comme KoBold et EarthAI ou des chercheurs comme ceux de l'université de Stanford, pourrait contribuer de manière significative à l'amélioration de la base d'informations de l'Europe, il est essentiel de prendre en compte les problèmes techniques potentiels et les incertitudes réglementaires de cette technologie, avant de la déployer et de la promouvoir en Europe. Contrairement à de nombreux autres domaines d'application de l'IA, qui peuvent s'appuyer sur un trésor d'observations pertinentes recueillies sur de nombreuses années, les données de forage pour les zones où des gisements totalement nouveaux doivent être découverts n'existent pas encore. La nature groupée des données autour des gisements connus constitue probablement le plus grand défi pour l'application de logiciels pilotés par l'IA dans ce domaine, car les géologues n'ont généralement pas beaucoup d'exemples positifs avec lesquels entraîner un algorithme à reconnaître des zones ou des minéraux similaires. À l'heure actuelle, le plus grand potentiel de l'exploration pilotée par l'IA est donc de s'appuyer davantage sur les mesures indirectes de la géophysique et de la géochimie et de les extrapoler ou de les soumettre à une interprétation plus détaillée. Ce n'est pas un hasard si l'un des principaux arguments qui a poussé KoBold à se concentrer sur le Canada était le simple fait que le pays dispose d'une grande quantité de données d'enquête accessibles au public, notamment des rapports détaillés sur le terrain, des données géochimiques provenant d'échantillons de forage, des données de levés magnétiques et électromagnétiques aériens, des mesures lidar et des collections d'images satellites remontant à plusieurs décennies.³⁵ La question est donc de savoir s'il existe des données aussi détaillées et aussi

³⁵ Stone, M. (2021). [The big tech quest to find the metals needed for the energy overhaul](#). MIT Technology Review (11.08.2021).

facilement accessibles pour le continent européen. Pour donner une idée de la granularité nécessaire des données : Comme mentionné ci-dessus, les systèmes d'IA pour prédire les minéraux critiques ont besoin de données stockées dans un espace 3D représentant la zone cubique dans laquelle les cibles doivent être évaluées. La distance entre les « blocs » dans cet espace 3D doit idéalement correspondre à l'échelle d'une cible de forage, c'est-à-dire 50 à 200 mètres.³⁶

La qualité des données existantes est importante, notamment dans le contexte de la nouvelle réglementation européenne sur les données. Les données géologiques sont souvent très fragmentaires, tant dans l'espace que dans le temps. Cette disparité, associée à des données de qualité inégale, peut conduire les systèmes d'IA à détecter de faux signaux ou à faire des prédictions incorrectes. Pour bien comprendre le problème, il est nécessaire de décrire brièvement le fonctionnement de l'apprentissage supervisé des systèmes d'IA. Fondamentalement, l'apprentissage supervisé signifie qu'un système d'IA apprend à l'aide d'exemples. Le modèle reçoit une variable d'entrée avec un identifiant correct correspondant ou « étiquette ». Pendant l'apprentissage, le modèle voit quelle étiquette correspond aux données et peut ainsi trouver des modèles entre les données et ces étiquettes. Les systèmes de détection des spams, dans lesquels un modèle est entraîné à classer les courriers électroniques qui sont des spams et ceux qui ne le sont pas, sont un exemple typique de cet apprentissage supervisé. Une application analogue de l'apprentissage automatique pour l'exploration ciblée dans le secteur minier serait la classification du minerai et des déchets. La figure 1 illustre la procédure typique par laquelle des entreprises telles que KoBold ou EarthAI introduisent les données pertinentes dans un algorithme d'apprentissage automatique pour optimiser la classification automatique des blocs de minerai et de déchets dans l'espace 3D. Les « vrais positifs » identifiés dans ce processus promettent une forte probabilité de succès en cas de forage.

Figure 1: Illustration expliquant les prédictions possibles de l'IA dans l'exploration minière



Source : Desharnais et al. (2017).

Le problème est que tout déséquilibre dans le nombre d'exemples positifs et négatifs dans l'ensemble de données est très problématique pour l'apprentissage automatique - et le rend potentiellement sujet

³⁶ Desharnais, G., Paiement, J.P., Hatfield, D. et Poupart, N. (2017). [Exploitation des BIG Data](#) : l'avenir du ciblage de l'exploration grâce à l'apprentissage automatique. Document de conférence octobre 2017, p. 4.

aux erreurs, ce qui peut conduire à un nombre accru de « faux négatifs » et de « faux positifs » (voir figure 1). En pratique, cela correspondrait à une augmentation du taux d'erreur lors du forage. Malheureusement, un examen des ensembles de données existants dans le secteur minier suggère qu'ils contiennent effectivement une distribution inégale d'exemples positifs et négatifs.³⁷ Les données sont souvent fortement regroupées autour des gisements connus, avec peu de points de données dans les zones qui n'ont pas encore été explorées. Les données de forage sont les plus fiables mais très localisées, tandis que les études géophysiques ou géochimiques ne couvrent parfois qu'une fraction du terrain à explorer. Dans certains cas, il n'existe aucun gisement connu de certains minéraux sur la propriété en question, de sorte qu'aucun exemple positif n'est disponible. En outre, il existe une disparité importante entre les différentes catégories de données requises pour l'exploration pilotée par l'IA ; en particulier, le nombre et la qualité des données géochimiques varient considérablement. L'utilisation d'un système d'IA qui a été entraîné sur un projet apparemment analogue peut donc s'avérer totalement trompeuse : « Former un algorithme sur des données de l'Alaska et l'appliquer au Nevada signifie qu'il peut avoir beaucoup d'hypothèses erronées », a déclaré dans une interview Sam Cantor, chef de produit chez **Minerva Intelligence**, une autre startup d'exploration minière pilotée par l'IA.³⁸

La question est donc de savoir si, à l'avenir, il sera nécessaire de procéder à un contrôle spécial de la qualité des données de formation des jeunes entreprises d'IA minière dans l'UE. Ce serait notamment le cas si ces systèmes étaient développés et utilisés non seulement pour la quantification des ressources géologiques mais aussi pour l'extraction des réserves. Dans ce dernier cas, ils pourraient être considérés comme « à haut risque » au titre de la loi européenne sur l'IA actuellement en cours de négociation, ce qui signifie qu'ils devraient répondre à des exigences spécifiques concernant la conception et la qualité des ensembles de données d'entraînement (ceux-ci devraient être pertinents, représentatifs, exempts d'erreurs et complets). La proposition de loi sur l'IA a été présentée par la Commission européenne le 21 avril 2022 et vise à réglementer l'IA en fonction de son potentiel de nuisance. La Commission attend désormais que le Conseil et le Parlement européen définissent leurs positions avant que les négociations interinstitutionnelles n'aient lieu en 2023.

Un élément crucial de cette législation sur l'IA est la question de savoir quelles applications d'IA doivent être classées comme étant à haut risque, car elles devront répondre à des exigences strictes. Selon le projet actuel, une classification à haut risque peut être effectuée de deux manières.³⁹ Premièrement, un système d'IA peut être contenu dans un produit qui relève des règles d'harmonisation de l'UE, tel qu'une machine d'extraction minière pilotée par l'IA. Dans ce cas, le texte précise qu'un système d'IA doit être classé à haut risque si sa défaillance ou son dysfonctionnement peut mettre en danger la santé, la sécurité ou les droits fondamentaux d'une personne. Le dysfonctionnement susmentionné des classifications de l'IA dans le secteur minier pourrait entraîner des dommages pour la santé ou la sécurité si, par exemple, des dommages environnementaux involontaires résultent d'une zone minière identifiée par l'IA, qu'un humain aurait pu prévoir. Deuxièmement, les applications de l'IA seront considérées comme à haut risque si elles relèvent des zones et des types d'utilisation énumérés à

³⁷ Desharnais, G., Paiement, J.P., Hatfield, D. et Poupart, N. (2017). [Exploitation des BIG Data](#) : l'avenir du ciblage de l'exploration grâce à l'apprentissage automatique. Document de conférence octobre 2017, p. 4.

³⁸ Beiser, V. (2022). [Ces algorithmes sont à la recherche d'un filon mère pour les batteries des véhicules électriques](#). WIRED (12.12.2022).

³⁹ Bertuzzi, L. (2022). Les principaux députés européens excluent l'IA à usage général des catégories à haut risque - pour l'instant. EURACTIV (12.12.2022).

l'annexe III du projet. Bien que les activités minières spécifiques ne figurent pas encore dans l'annexe III, celle-ci contient une catégorie intitulée « Infrastructures critiques », qui comprend jusqu'à présent les systèmes d'IA utilisés comme composants de sécurité dans la gestion et l'exploitation des infrastructures numériques critiques, le transport routier et la fourniture d'eau, de gaz, de chauffage et d'électricité. En outre, la Commission aura vraisemblablement le pouvoir de modifier la liste de l'annexe III en ajoutant ou en supprimant des zones à haut risque ou des types d'utilisation spécifiques si le système d'IA « présente un risque sérieux d'atteinte à la santé et à la sécurité ou un risque d'impact négatif sur les droits fondamentaux, l'environnement ou la démocratie et l'État de droit ». Pour les mêmes raisons que celles exposées ci-dessus, les sociétés minières qui développent ou utilisent des systèmes d'IA pourraient être expressément incluses dans le cadre réglementaire de la loi sur l'IA à un stade ultérieur, lorsqu'elles seront plus actives sur le marché européen.

Dans cette discussion, il est essentiel de faire la différence entre l'exploration et l'extraction de matières premières. Les algorithmes décrits dans la section 3.2 visent initialement à quantifier les ressources géologiques, et non les réserves (c'est-à-dire la partie des ressources qui peut être extraite de manière économique). La décision d'extraire - et donc la responsabilité de la plupart des dommages environnementaux potentiels - resterait donc entre les mains des compagnies minières. En outre, le règlement sur l'IA proposé par l'UE ne s'applique pas aux systèmes d'IA, ou à leurs résultats, qui sont spécifiquement développés ou mis en service dans le seul but de la recherche et du développement scientifiques. Néanmoins, l'exemple de KoBold décrit ci-dessus montre qu'à l'avenir, il y aura des entreprises verticalement intégrées qui traduiront les résultats de leurs systèmes d'IA directement en achat et en analyse physique de certaines zones. En outre, il convient de souligner que les systèmes d'IA sont généralement développés et distribués via des chaînes de valeur complexes, ce qui rend difficile la détermination précise de la responsabilité juridique des développeurs de logiciels d'IA envers ses utilisateurs au sens de la loi sur l'IA. La proposition de la Commission repose essentiellement sur une vision linéaire de la chaîne de valeur de l'IA, selon laquelle une entreprise met un système d'IA particulier sur le marché et, si ce système est jugé à haut risque, est rendue responsable du respect du règlement.⁴⁰ À cet égard, il convient de se référer au récent texte de compromis, qui contient certains amendements visant à explorer la répartition des rôles et des responsabilités dans la chaîne de valeur de l'IA.⁴¹ Même si la législation européenne n'est pas applicable aux efforts de quantification pure, dans tous les cas où le nombre et/ou la qualité des données géologiques et physiques ne sont pas garantis, une plus grande validation par des experts devrait être assurée afin d'éviter des conclusions erronées qui pourraient avoir des conséquences négatives.⁴²

Même s'il est possible de générer et de partager un ensemble de données d'entraînement suffisamment granulaire et de haute qualité pour l'Europe, qui soit éventuellement conforme au règlement sur l'IA, les problèmes d'application technique actuels des systèmes basés sur l'IA doivent encore être pris en compte. Le géologue d'exploration Guy Desharnais, qui a fait des recherches sur

⁴⁰ Sur cette question, voir : Engler, A. & Renda, A. (2022). [Réconcilier la chaîne de valeur de l'IA avec la loi sur l'intelligence artificielle de l'UE](#). CEPS In-Depth Analysis, septembre 2022 - 03.

⁴¹ Proposition de règlement du Parlement européen et du Conseil établissant des règles harmonisées en matière d'intelligence artificielle (loi sur l'intelligence artificielle) et modifiant certains actes législatifs de l'Union - Approche générale. Bruxelles (25.11.2022) 25 novembre 2022 (OR. en), 14954/2.

⁴² C'est également la demande de : Davies, S. (2020). Évaluation des méthodologies pour prédire la dotation minérale potentielle lors de l'entrée dans un espace d'exploration immature, en utilisant le district aurifère gréseux orogénique d'Australie occidentale comme laboratoire naturel. Thèse de doctorat, The University of Western Australia.

les applications minières de l'apprentissage automatique et qui défend en principe son utilité, se joint à plusieurs collègues pour demander instamment la poursuite de la recherche fondamentale afin de garantir une application solide de l'IA dans le secteur minier.⁴³ Selon ses conclusions, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour identifier les algorithmes les plus robustes et les plus productifs capables de prédire les corps minéralisés. Les données d'entrée ainsi que la « sortie » doivent également être soigneusement vérifiées pour s'assurer que le modèle ne se contente pas de prédire ce qui est déjà connu ou de fournir des résultats incorrects. Selon M. Desharnais, cela nécessitera des données géoscientifiques de haute qualité, des interprétations solides, du bon sens et, dans la plupart des cas, plusieurs itérations pour comprendre ce que l'IA prédit exactement.⁴⁴

Cette exigence est également conforme aux évolutions récentes de la législation numérique de l'UE. Déjà, les lignes directrices éthiques de la Commission sur l'IA digne de confiance, publiées en 2019, ont identifié l'agence et la surveillance humaines comme l'un des principes fondamentaux de l'IA éthique.⁴⁵ Ce document introduit les concepts de « human in the loop » comme capacité d'intervention humaine et de « human on the loop » pour la surveillance de l'activité globale. En ce qui concerne la loi sur l'IA, la version actuelle de l'article 14 (1) exige que les systèmes d'IA à haut risque soient conçus et développés de manière à pouvoir être effectivement surveillés par des personnes physiques pendant la période d'utilisation du système d'IA, y compris avec des outils d'interface homme-machine appropriés. Certains critiques affirment que la loi sur l'IA ne parvient pas à identifier et à réglementer des mécanismes plus précis pour une surveillance humaine efficace.⁴⁶ Ils demandent une plus grande clarté quant au moment et au lieu où les humains auront le dernier mot dans la prise de décision, ou quand la simple surveillance humaine du système est suffisante. En raison des impondérables qui ont été identifiés, cela serait également souhaitable pour les domaines d'utilisation de la technologie décrits dans le secteur minier.

Étant donné que les métaux cibles, une fois localisés, doivent encore être physiquement extraits, ce qui est dommageable pour l'environnement, une tâche importante pour tout outil de prospection piloté par l'IA est également de minimiser l'impact environnemental. Selon KoBold, l'entreprise décide elle-même des lieux de prospection et déclare qu'elle ne travaillera que dans les zones où l'exploitation de certains minéraux est éthique et soutenue par la communauté concernée.⁴⁷ On peut se demander si les interdépendances entre le site d'excavation potentiel et d'autres métaux à proximité, la légitimité éthique et la popularité locale des mesures, peuvent être prises en compte par un système d'IA. Ce n'est pas le cas, du moins, pour les systèmes d'exploration IA dont le fonctionnement est décrit dans des documents accessibles au public, car ceux-ci considèrent chaque bloc 3D comme une entité unique, et il n'y a pas de rétroaction vers des métadonnées externes.⁴⁸ En d'autres termes, chaque bloc virtuel du système 3D est analysé de manière isolée, sans tenir compte de sa position spatiale

⁴³ Desharnais, G., Paiement, J.P., Hatfield, D. et Poupart, N. (2017). [Exploitation des BIG Data](#) : l'avenir du ciblage de l'exploration grâce à l'apprentissage automatique. Document de conférence octobre 2017.

⁴⁴ [Ces déclarations font référence à l'interview que Guy Desharnais a donnée au MIT Technology Review](#). Voir : Stone, M. (2021). The big tech quest to find the metals needed for the energy overhaul. MIT Technology Review (11.08.2021).

⁴⁵ [Commission européenne \(2019\)](#). Lignes directrices éthiques pour une IA digne de confiance.

⁴⁶ Domingo, S. (2022). [L'intervention humaine et la surveillance humaine dans le GDPR et la loi sur l'IA](#). Trilateral Research Ethical AI (31.05.2022).

⁴⁷ Stone, M. (2021). [The big tech quest to find the metals needed for the energy overhaul](#). MIT Technology Review (11.08.2021).

⁴⁸ Ceci se rapporte au modèle décrit dans : Desharnais, G., Paiement, J.P., Hatfield, D. & Poupart, N. (2017). Exploitation des BIG Data : [l'avenir du ciblage de l'exploration grâce à l'apprentissage automatique](#). Document de conférence octobre 2017, p. 5.

dans une image plus large. La création d'un système d'IA permettant de corréler les tendances potentielles des données entre des blocs voisins augmenterait de façon exponentielle le problème mathématique à résoudre et pose probablement des problèmes insurmontables pour la plupart des start-ups dans ce domaine. Néanmoins, ces considérations ne s'appliquent qu'à la prise en compte des interdépendances spatiales. Les indicateurs sociaux concernant la défense et l'acceptation éthiques, tels qu'ils sont déjà régulièrement collectés dans des enquêtes à travers l'Europe, ou pourraient facilement l'être, peuvent vraisemblablement être intégrés dans l'ensemble des données relativement facilement en tant que paramètres externes globaux, ne serait-ce que parce qu'ils sont nécessairement à plus grande échelle que les enquêtes géologiques. Comme expliqué plus bas, lorsqu'il s'agit de durabilité sociale et écologique, les algorithmes promus pour l'exploration des terres rares en Europe ne devraient donc pas se limiter aux gisements primaires mais devraient également évaluer les informations sur les effets environnementaux attendus de l'exploitation commerciale.

Cela souligne le besoin ultime d'un système dit « humain dans la boucle » pour le secteur minier, conformément aux lignes directrices éthiques susmentionnées de la Commission pour une IA digne de confiance et aux demandes de la plupart des experts. Ces dernières années, le terme est devenu largement utilisé dans le domaine de l'IA, où il désigne essentiellement les systèmes d'IA dans lesquels l'effort combiné des humains et des machines contribue à améliorer les résultats globaux et à accélérer l'apprentissage automatique.⁴⁹ Dans ces systèmes, il y a généralement une interaction continue entre le superviseur humain et l'IA pour former un modèle, puis le mettre à jour en permanence dès qu'il est déployé. Un bon exemple est le système d'IA de l'équipe SGS Geostat, qui a remporté le « Integra Gold Rush Challenge » en 2016. Ce concours d'innovation a publié des données historiques sur la propriété aurifère Sigma-Lamaque à Val D'Or, au Canada, et a mis le public au défi de trouver des moyens novateurs d'identifier des cibles de forage pertinentes. La soumission gagnante a combiné une approche traditionnelle de poids des preuves avec l'apprentissage automatique et le contrôle des cibles en réalité virtuelle.⁵⁰ Ce n'est que par cette combinaison d'analyses qualitatives et quantitatives et de validation humaine qu'une valeur ajoutée concrète a émergé tout en réduisant les risques imprévus. Kobold a vécu la même expérience : Une fois les prédictions de l'IA réalisées par les informaticiens internes de l'entreprise, il a fallu que le personnel doté d'une expertise géologique applique son intuition pour passer au crible les propositions improbables et trouver comment forer un seul trou afin de réduire au maximum les possibilités restantes pour être encore plus rentable.⁵¹

Enfin, il existe des défis dans le domaine de l'éducation. De manière significative, deux tiers de l'équipe de KoBold sont des scientifiques des données ou des ingénieurs logiciels qui n'ont jamais travaillé dans l'exploration ; l'autre tiers est constitué de mineurs expérimentés.⁵² Donc, si l'Europe veut importer cette technologie, il est urgent de disposer d'une expertise technique en IA, idéalement couplée à des connaissances de base en sciences de la terre. Cependant, selon les experts, il existe très peu de cours, de plateformes d'information ou de programmes de formation professionnelle qui couvrent de

⁴⁹ Humans in the Loop (non daté). [Qu'est-ce qu'un Humain dans la Boucle ?](#)

⁵⁰ Desharnais, G., Paiement, J.P., Hatfield, D. et Poupart, N. (2017). [Exploitation des BIG Data](#) : l'avenir du ciblage de l'exploration grâce à l'apprentissage automatique. Document de conférence octobre 2017, p. 3.

⁵¹ Beiser, V. (2022). [Ces algorithmes sont à la recherche d'un filon mère pour les batteries des véhicules électriques](#). WIRED (12.12.2022).

⁵² Beiser, V. (2022). [Ces algorithmes sont à la recherche d'un filon mère pour les batteries des véhicules électriques](#). WIRED (12.12.2022).

manière exhaustive tous les aspects de la prise de décision en situation d'incertitude dans l'industrie minière.⁵³ Le problème réside dans l'aspect multidisciplinaire, qui nécessite des connaissances en géosciences, en science des données, en informatique et en science de la décision. Empiriquement, ce problème se manifeste par des incohérences entre les estimations des experts et les estimations fondées sur les données, ainsi que par des incohérences entre les différents groupes d'experts chargés d'évaluer la présence de certains minéraux.⁵⁴ Cela peut s'expliquer par l'utilisation de différentes stratégies ainsi que par des différences d'expérience conduisant à des compétences variables en matière d'évaluation de l'incertitude. Les auteurs de cette comparaison suggèrent donc des programmes de formation pratiques basés sur des scénarios et une sélection minutieuse des équipes afin de maximiser la diversité des compétences comme moyen d'améliorer les évaluations.⁵⁵

⁵³ Caers, J.K. (2018). [Quantifier l'incertitude sur les ressources de la Terre](#). Eos (99).

⁵⁴ Davies, S. (2020). Évaluation des méthodologies pour prédire la dotation minérale potentielle lors de l'entrée dans un espace d'exploration immature, en utilisant le district aurifère gréseux orogénique d'Australie occidentale comme laboratoire naturel. Thèse de doctorat, The University of Western Australia.

⁵⁵ Davies, S. (2020). Évaluation des méthodologies pour prédire la dotation minérale potentielle lors de l'entrée dans un espace d'exploration immature, en utilisant le district aurifère gréseux orogénique d'Australie occidentale comme laboratoire naturel. Thèse de doctorat, The University of Western Australia.

4 Promouvoir l'IA dans le cadre de la politique européenne des matières premières

4.1 Prise en compte dans la stratégie de l'UE en matière de matières premières

L'importance stratégique des matières premières critiques a été soulignée pour la première fois par la Commission européenne en 2008 par le biais d'une « initiative sur les matières premières ».⁵⁶ Dès cette époque, la Commission a estimé que l'élargissement de la base de connaissances sur les gisements situés dans l'UE était une étape essentielle pour réduire les incertitudes en matière d'approvisionnement. À cette fin, un meilleur échange d'informations entre les instituts géologiques nationaux était demandé. À l'époque, il n'était pas question d'utiliser l'intelligence artificielle dans l'exploration. La communication ultérieure « Marchés des produits de base et matières premières » de 2011 a ensuite présenté la première liste de matières premières critiques.⁵⁷ L'existence de ces matières premières critiques a conduit à l'appel à la création d'une base de données européenne harmonisée sur les gisements de matières premières. Le rapport de la Commission sur les *matières premières critiques et l'économie circulaire*, publié en 2018, recommande la même chose pour l'enregistrement des ressources secondaires issues des déchets tout au long de la chaîne d'approvisionnement.⁵⁸ Le *plan d'action 2020 sur les matières premières critiques* souligne le potentiel important de la télédétection offert par le programme européen d'observation de la Terre *Copernicus*. Celles-ci seront davantage utilisées à l'avenir, dans le cadre du plan d'action, tant pour la localisation des gisements que pour la surveillance environnementale des régions d'extraction existantes.⁵⁹ Même si l'utilisation de l'IA n'est pas explicitement mentionnée ici, il est clair, selon les experts, que le grand volume et la diversité des données fournies par *Copernicus* suggèrent une évaluation de plus en plus basée sur l'IA.⁶⁰ Dans ce contexte, il convient de noter que de nouveaux moyens améliorés d'accéder aux *données Copernicus* sont disponibles depuis fin janvier 2023, ce qui permet aux entreprises intéressées d'obtenir plus facilement des géodonnées pertinentes pour l'entraînement des systèmes d'IA.⁶¹

La Commission a annoncé la rédaction d'une législation complète, pour la fin mars 2023, afin d'améliorer la manipulation des matières premières critiques. Les premiers détails du contenu ont émergé à l'automne 2022 dans le cadre du processus de consultation associé. Ainsi, « l'amélioration de la surveillance, de la gestion des risques et de la gouvernance de l'UE dans le domaine des matières premières critiques » sera l'un des quatre principaux piliers de la proposition législative.⁶² Outre les outils de cartographie, les systèmes d'alerte précoce et les tests de résistance des chaînes d'approvisionnement sont mentionnés comme des outils de surveillance possibles, c'est-à-dire des

⁵⁶ Commission européenne (2008). L'initiative « matières premières » - répondre à nos besoins fondamentaux pour la croissance et l'emploi en Europe Communication de la Commission au Parlement européen et au Conseil. COM(2008) 699.

⁵⁷ Commission européenne (2011). Relever les défis sur les marchés des produits de base et des matières premières Communication de la Commission au Parlement européen et au Conseil. COM(2011) 25.

⁵⁸ Commission européenne (2018). Rapport sur les matières premières critiques et l'économie circulaire.

⁵⁹ Commission européenne (2020). Résilience des matières premières critiques : Tracer la voie vers plus de sécurité et de durabilité. Communication des Commissions au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions. COM(2020) 474.

⁶⁰ Gouvernement fédéral allemand (2021). [Copernic : Neue Dimensionen](#). Nationales Forum für Fernerkundung und Copernicus 2021 - 23. bis 24. März 2021. Ergebnisbericht.

⁶¹ EARSC (2023). [EOcafe](#) : The New Copernicus Data Access Service (06.01.2023).

⁶² Commission européenne (2022). Loi européenne sur les matières premières critiques - Appel à contribution pour une analyse d'impact. Ref. Ares(2022)7155798.

domaines dont la complexité nécessitera très probablement le recours à l'IA. Le concept de la Commission indique que la contribution de l'IA à la sécurisation de l'approvisionnement en matières premières pourrait donc être de nature plus globale et aller au-delà de la simple exploration des gisements. Les documents de consultation ne précisent pas dans quelle mesure cette contribution sera également liée, dans le cadre de la proposition législative, à des règles ou à des recommandations sur l'utilisation des instruments de financement publics.

4.2 Justifier l'éligibilité à un financement

Du point de vue d'un investisseur, la décision d'explorer de nouveaux gisements de ressources - tout comme l'exploitation de gisements existants - doit être soumise à un calcul d'optimisation dynamique. Les activités d'exploration entraînent des coûts dans le présent ; le retour sur ces coûts ne peut être attendu que dans le futur, sous la forme d'une réserve plus importante de ressources exploitables. Ce rendement est soumis à l'incertitude au moment de la décision et doit donc être considérablement réduit. L'incertitude ne porte pas seulement sur la question de la découverte des ressources mais aussi sur leur viabilité économique. En outre, dans de nombreux cas, il existe également des risques réglementaires, c'est-à-dire l'incertitude quant à savoir si l'exploitation commerciale de nouveaux gisements sera autorisée à long terme et, le cas échéant, à quelles conditions. Par rapport aux autres investissements, le rendement attendu des projets d'exploration devra donc généralement tenir compte de primes de risque élevées. La prise en compte d'indicateurs générés par l'IA dans la prise de décision peut contribuer à réduire les incertitudes ou du moins à rendre les risques existants plus transparents. Du point de vue de l'investisseur, l'IA peut donc contribuer à réduire les coûts du capital et à rendre les projets d'exploration plus attrayants.

Néanmoins, une impulsion politique est nécessaire pour mettre en place des marchés de services adaptés en Europe. Cela est dû à deux particularités : l'existence d'externalités de l'information dans le secteur de l'exploration⁶³, et les économies d'échelle sur le marché des fournisseurs de services d'IA. Les activités d'exploration donnent toujours lieu à de nouvelles connaissances, même si elles n'aboutissent pas. Les obligations de divulgation des données collectées au cours de l'exploration (comme en Australie, par exemple⁶⁴), donnent lieu à un gain d'information immédiat pour le domaine public, et donc aussi pour les concurrents potentiels. Et même sans obligation de divulgation, on peut tirer des conclusions en observant si les projets sont poursuivis ou non. Les investisseurs eux-mêmes ne voient aucun avantage dans cette **externalité positive de l'information**, qui, dans le pire des cas, peut même entraîner une réticence à investir. Du point de vue de la société, cela signifie que même si les risques existants sont correctement évalués, on a tendance à investir trop peu dans les activités d'exploration. En principe, cela plaide en faveur d'un soutien financier public aux projets d'exploration.

Dans le cas de l'exploration basée sur l'IA, les caractéristiques économiques des algorithmes fournissent une justification supplémentaire. Les **économies d'échelle** existent ici sous des formes à la fois statiques et dynamiques. D'une part, les coûts fixes de développement et de vérification des algorithmes dominent la structure des coûts par rapport aux coûts variables de la vente de produits basés sur des algorithmes. Les coûts à couvrir par client sont donc susceptibles d'être relativement

⁶³ Fogarty, J.J., et Sagerer, S. (2016). Externalités d'exploration et subventions gouvernementales : Le rendement du gouvernement. *Politique des ressources* (47), p. 78-86.

⁶⁴ Minéraux d'Australie (2022). [Législation, réglementation et directives](#).

élevés lors de l'entrée sur le marché et de diminuer continuellement à mesure que la clientèle augmente. Cet effet est renforcé par les économies d'échelle dynamiques : Une base de clients croissante signifie qu'il y a plus de données pour optimiser les algorithmes, ce qui améliore encore la qualité du service d'IA.⁶⁵ Non seulement le soutien de l'État pourrait accélérer ce processus, mais dans le cas de l'Europe, il pourrait également contribuer à prévenir l'émergence à long terme de monopoles non européens sur ce segment, contribuant ainsi à l'objectif géopolitique global de réduction de la dépendance et de renforcement de la souveraineté européenne, y compris dans le secteur des matières premières.

Ces deux effets se renforcent également l'un l'autre. Outre les données fournies par le client, les externalités d'information provenant de projets externes peuvent également contribuer à l'optimisation des algorithmes. Inversement, la généralisation de l'IA spécialisée permettra une utilisation plus efficace des informations disponibles publiquement. Ces potentiels peuvent être utilisés à des fins entrepreneuriales et réglementaires. À l'avenir, par exemple, l'IA pourrait potentiellement être utilisée dans les procédures d'approbation publique pour l'attribution de permis d'exploration et d'exploitation minière. L'IA pourrait ainsi contribuer à réduire les coûts administratifs et la durée des procédures d'approbation, l'un des principaux facteurs de blocage dans le développement des projets.

5 Recommandations pour l'action de l'UE

Après l'incertitude liée à la pandémie au début de l'année 2020, qui a bloqué l'activité sur le terrain dans le secteur minier, le forage a repris à partir de septembre 2020, ce qui a conduit à des résultats pour l'ensemble de l'année de 41 026 puits forés sur 1 098 projets. Ces deux chiffres ont considérablement augmenté en 2021 : 68 982 puits ont été enregistrés avec 1 611 projets, soit une augmentation par rapport à l'année précédente de 68 % et 47 %, respectivement.⁶⁶ Cette tendance n'a toutefois pas encore atteint l'Europe. Sur la base de nos recherches d'exemples d'applications actuelles dans le domaine de la découverte et de l'extraction de minéraux critiques pilotées par l'IA ; et sur la base de la discussion précédente sur l'éligibilité au financement et les incertitudes techniques et réglementaires potentielles, nous recommandons les mesures de soutien suivantes au niveau européen.

1. Exigences pour un meilleur accès à des géodonnées fiables

Il est nécessaire de disposer de moyens plus efficaces, plus simples et moins coûteux pour accéder à des géodonnées publiques de haute qualité. Il vaut la peine d'utiliser des ressources suffisantes pour faire avancer rapidement le processus de numérisation nécessaire, car les données générées et les systèmes d'IA développés sur la base de ces données auront des implications qui vont bien au-delà de l'extraction des métaux rares et peuvent également galvaniser d'autres domaines d'application qui utilisent des données cartographiques géologiques ou écologiques. L'expérience de la DARPA, l'agence de défense américaine, et des entreprises MITRE et NASA Jet Propulsion Laboratory, montre que le potentiel le plus important pour une solution à court terme aux besoins aigus en données est

⁶⁵ Varian, H. (2018). Intelligence artificielle, économie et organisation industrielle. In : L'économie de l'intelligence artificielle : un agenda. Chicago, US : University of Chicago Press, pp. 399-419.

⁶⁶ S&P Global Market Intelligence (2022). Tendances mondiales en matière d'exploration. Édition spéciale de l'ACPE, avril 2022, p. 17.

d'améliorer le géoréférencement et l'extraction des caractéristiques géologiques individuelles sur les cartes numérisées ou scannées existantes.⁶⁷ Les aides financières ciblées, les défis de l'innovation (voir ci-dessous) et les cadres réglementaires pour l'acquisition, l'échange et l'utilisation des données pertinentes devraient donc viser en priorité ce point du « workflow » de l'IA.

Sur ce dernier point, les mesures réglementaires nécessaires ont déjà été prises ou sont en passe de devenir des lois : Au niveau européen, la directive INSPIRE 2007/2/CE stipule déjà que les États membres doivent fournir certains jeux de géodonnées. La loi sur la gouvernance des données, applicable à partir du 24 septembre 2023, réglera l'accès aux données protégées du secteur public et facilitera le partage des données au sein de l'UE, par exemple, par le biais de services de courtage de données, de coopératives de données et d'organisations d'« altruisme des données ».⁶⁸ Toutefois, comme le règlement de l'UE ne fait qu'encourager (plutôt qu'obliger) les autorités publiques à fournir des données, le succès dépend principalement de leur volonté de le faire volontairement.⁶⁹ Enfin, il y a la loi sur les données, qui vise à garantir que la création de valeur dérivée des données soit répartie plus équitablement entre les acteurs de l'économie des données, et formule à cette fin des obligations de partage des données pour les propriétaires de données (généralement les fabricants de produits de l'internet des objets et les fournisseurs de services connectés).⁷⁰ Toutefois, au vu des enjeux très variés en matière d'échange de données, illustrés ici par l'exemple de l'exploitation minière, des obligations spécifiques de partage de données adaptées aux particularités du secteur respectif seraient plus efficaces, ce qui tend à plaider en faveur d'une approche réglementaire sectorielle plus nuancée.⁷¹ Le champ d'application de la loi sur les données doit également être clarifié. Enfin, l'UE prévoit actuellement douze salles de données européennes communes dans des secteurs stratégiques et des domaines d'intérêt public. Elles sont destinées à permettre un partage et une réutilisation plus intensifs des données.

La Commission a également publié le 20 janvier 2023 une liste d'ensembles de données dits « de grande valeur », que les organismes publics doivent mettre gratuitement à disposition en vue de leur réutilisation dans un délai de 16 mois.⁷² Ces ensembles de données doivent être mis à disposition dans un format lisible par machine via une interface de programmation, raison pour laquelle ils peuvent être utilisés facilement et rapidement comme données d'entraînement pour les applications d'apprentissage automatique - comme celles déjà développées par les start-up décrites ci-dessus. Le règlement est basé sur la directive sur les données ouvertes, qui définit six catégories d'ensembles de données de grande valeur : géospatiales, observation de la terre et environnement, météorologiques, statistiques, entreprises et mobilité. La catégorie « observation de la terre et environnement », qui comprend les données spatiales, les données de télédétection, les données au sol et les données in situ, ainsi que les ensembles de données environnementales et climatiques qui relèvent des thèmes de données INSPIRE au titre de la directive 2007/2/CE, sera particulièrement importante pour les jeunes entreprises minières.⁷³ Cette dernière rubrique comprend des thèmes de données tels que l'hydrographie, la géologie, les régions biogéographiques, l'utilisation des sols, les ressources

⁶⁷ Voir le rapport à l'adresse suivante DARPA (2022). [La DARPA annonce les gagnants du concours AI for Critical Mineral Assessment](#) (16.12.2022).

⁶⁸ Règlement (UE) 2022/868 du Parlement européen et du Conseil du 30 mai 2022 sur la gouvernance européenne des données et modifiant le règlement (UE) 2018/1724 (loi sur la gouvernance des données), JO L 152, 3.6.2022, p. 1-44.

⁶⁹ Eckhardt, P. & Anzini, M. (2021). cepPolicyBrief on COM2020_767. [cepPolicyBrief 6/2021](#).

⁷⁰ Proposition de règlement du Parlement européen et du Conseil concernant des règles harmonisées relatives à l'accès équitable aux données et à leur utilisation (loi sur les données). COM/2022/68 final.

⁷¹ Eckhardt, P. & Hoffmann, A. (2022). cepPolicyBrief sur COM(2022) 68. [cepPolicyBrief 11/2022](#).

⁷² La [Commission définit des ensembles de données de grande valeur à mettre à disposition pour la réutilisation](#).

⁷³ Règlement d'exécution (UE) 2023/138 de la Commission du 21 décembre 2022 établissant des ensembles de données spécifiques de grande valeur et les modalités de leur publication et de leur réutilisation, JO L 19 du 20.1.2023, p. 43-75.

minérales et les sols - précisément le type de données que des start-ups comme KoBold analysent déjà avec succès en dehors de l'Europe. En outre, il convient de noter que le règlement permet d'élargir cette gamme de thèmes à une date ultérieure. Cela devrait permettre à l'avenir de prendre encore mieux en compte les développements technologiques et économiques dans le secteur des start-up minières. En outre, il convient d'insister sur une mise en œuvre rapide du règlement : Si possible, les données nécessaires à l'exploration des métaux rares devraient être mises à disposition plus tôt que les 16 mois prévus, afin de soutenir l'*initiative* actuelle de la Commission en *faveur des technologies propres*, même si cela n'est possible que pour certaines régions d'Europe. Enfin, les experts du domaine devraient vérifier si les données fournies sont effectivement suffisamment granulaires pour permettre des activités d'IA par les start-ups minières.

2. Promotion de l'exploration des matières premières assistée par l'IA

Un soutien financier plus important est nécessaire pour les start-ups européennes dans ce secteur de niche, car les investissements et les programmes de soutien précédents se sont principalement concentrés sur les régions et les entreprises non européennes. Les prix de la plupart des matières premières ont poursuivi leur tendance à la hausse en 2021, ce qui a été récompensé en conséquence par les marchés des capitaux : Le financement par les sociétés juniors et intermédiaires a augmenté pour atteindre 21,55 milliards de dollars en 2021, soit près du double du montant déboursé en 2020.⁷⁴ Toutefois, près des deux tiers de cette augmentation proviennent d'entreprises d'Australie et du Canada, dont le budget total a augmenté de 556 millions de dollars par rapport à 2020.⁷⁵ L'Europe doit de toute urgence rattraper son retard dans ce domaine. L'argument en faveur du soutien aux activités d'exploration n'inclut pas encore un appel à se lancer dans l'exploitation minière en Europe car, en raison des externalités informationnelles (positives) qui en résultent, l'exploration peut encore offrir une valeur sociale ajoutée, même si l'on conclut que se lancer dans l'exploitation minière aurait des effets environnementaux (négatifs) prédominants. En conséquence, il faut souligner que notre argument en faveur de l'éligibilité au financement se réfère à l'utilisation de l'IA dans l'exploration, ce qui ne veut pas dire que l'IA dans l'exploitation minière n'est pas utile, mais l'éligibilité au financement d'une industrie minière métallique européenne est une question plus fondamentale qui dépasse la portée et l'échelle de cet **Input du cep**.

3. Organisation de concours d'innovation pour le déploiement de l'IA dans le secteur minier

L'interaction entre la recherche et l'application de l'IA dans le secteur minier peut être énormément améliorée par le biais de concours d'innovation ciblés, même avec de petites incitations financières. Compte tenu de l'urgence actuelle d'augmenter et de sécuriser davantage l'approvisionnement en minéraux critiques, l'agence de défense américaine DARPA, en collaboration avec l'US Geological Survey (USGS), a lancé le concours AI for Critical Mineral Assessment en août 2022.⁷⁶ Ce partenariat aidera l'USGS à réaliser des évaluations pour plus de 50 ressources minérales critiques afin d'améliorer la planification économique et la prise de décision en matière d'aménagement du territoire. Le concours visait à recueillir des idées pour accélérer radicalement au moins certaines parties du processus d'évaluation en utilisant l'IA pour automatiser les processus critiques. Au total, 18 équipes issues de l'industrie, du monde universitaire et même d'un lycéen se sont affrontées pour remporter des prix en espèces de l'ordre de cinq chiffres. L'organisation d'un concours similaire en Europe

⁷⁴ S&P Global Market Intelligence (2022). Tendances mondiales en matière d'exploration. Édition spéciale de l'ACPE, avril 2022, p. 5.

⁷⁵ S&P Global Market Intelligence (2022). Tendances mondiales en matière d'exploration. Édition spéciale de l'ACPE, avril 2022, p. 12.

⁷⁶ DARPA (2022). [La DARPA annonce les gagnants du concours AI for Critical Mineral Assessment](#) (16.12.2022).

pourrait aider la Commission et les sociétés minières spécialisées à automatiser les étapes clés de l'évaluation des cartes géologiques des gisements de minéraux cruciaux pour l'économie et la sécurité européennes.

4. Établir des normes techniques et des règles de transparence pour l'utilisation de l'IA dans le secteur minier.

Il est essentiel d'éviter les erreurs ou les incohérences dans les données sous-jacentes pour prévenir les faux résultats ou les effets secondaires indésirables. Les experts du secteur minier soulignent que même de simples incohérences telles que des différences d'unités - par exemple, g/tonne contre once/tonne - se produisent et ont un effet néfaste sur les prévisions de l'IA.⁷⁷ Des normes uniformes et des exigences minimales de qualité pour les ensembles de données à utiliser permettent de contrer ce phénomène. Les directives et les normes pour la collecte, le traitement et l'inversion des données tTEM récemment élaborées par l'Agence danoise de protection de l'environnement et l'Institut des géosciences de l'Université d'Aarhus en sont un bon exemple.⁷⁸ En outre, il est nécessaire de veiller à ce que les effets d'interdépendance - en particulier les aspects environnementaux critiques - soient toujours pris en compte, même dans les processus pilotés par l'IA (« human in the loop »). Afin de répondre aux normes de haute qualité fixées par la future législation européenne sur les données, les solutions d'IA existantes doivent être évaluées plus avant et développées pour devenir opérationnelles dans le contexte européen. En particulier, les réseaux neuronaux, qui se sont déjà révélés extrêmement prometteurs dans de nombreux autres secteurs, sont généralement totalement opaques et n'offrent aucun moyen de comprendre la logique qui sous-tend les conclusions tirées. Cela pourrait être problématique, par exemple, dans le contexte de la loi européenne sur l'IA, mentionnée ci-dessus, qui vise à rendre les systèmes d'IA plus transparents. L'article 13 du projet actuel stipule ce qui suit : « Les systèmes d'IA à haut risque sont conçus et développés de manière à ce que leur fonctionnement soit suffisamment transparent pour permettre aux utilisateurs d'interpréter les résultats du système et de les utiliser de manière appropriée. » Cependant, comme l'ont souligné les critiques, ce texte ne précise pas suffisamment ce que signifie pour les utilisateurs d'un système d'IA le fait d'interpréter ses résultats, ni n'indique les mesures techniques qu'un fournisseur doit prendre pour démontrer la conformité de son système.⁷⁹ Pour contrer cette incertitude juridique et accroître la confiance de la population et des décideurs dans l'exploration pilotée par l'IA, il est recommandé d'utiliser d'autres méthodes plus transparentes, parallèlement à une approche d'IA pure, qui fourniraient des informations qualitatives sur la pondération relative des différents facteurs, appelées « méthodes de la boîte grise ».⁸⁰

Enfin, les normes seront également cruciales si l'optimisation des processus pilotée par l'IA dans les zones minières existantes a lieu à une date ultérieure. Comme le montre la recherche susmentionnée de David Zhen Yin au SCERF, d'importants gains d'automatisation ont été réalisés dans le domaine du forage de puits, qui pourraient générer des gains d'efficacité économique ainsi que réduire les risques

⁷⁷ Desharnais, G., Paiement, J.P., Hatfield, D. et Poupart, N. (2017). [Exploitation des BIG Data](#) : l'avenir du ciblage de l'exploration grâce à l'apprentissage automatique. Document de conférence octobre 2017, p. 4.

⁷⁸ Groupe HydroGéophysique (2020). [Lignes directrices et normes pour la collecte, le traitement et l'inversion des données tTEM](#). Version 1.1 - Novembre 2020.

⁷⁹ Grady, P. (2022). [L'UE devrait clarifier la distinction entre explicabilité et interprétabilité dans la loi sur l'IA](#). Centre for Data Innovation (31.08.2022).

⁸⁰ Desharnais, G., Paiement, J.P., Hatfield, D. et Poupart, N. (2017). [Exploitation des BIG Data](#) : l'avenir du ciblage de l'exploration grâce à l'apprentissage automatique. Document de conférence octobre 2017. p. 3.

pour l'environnement. Contrairement au financement des activités d'exploration, l'objectif ici n'est pas de créer des externalités positives mais d'éviter des externalités négatives déjà quantifiables. Cela plaide en faveur de l'utilisation de normes contraignantes comme instrument de contrôle.

5. Création d'options coordonnées de formation et de perfectionnement

Il convient de créer et de promouvoir des possibilités de formation et de formation continue ciblées dans le domaine des géosciences. Une revue de la littérature des experts du secteur a montré que, en particulier, les possibilités d'information et de formation qui couvrent de manière exhaustive les aspects de la prise de décision en situation d'incertitude dans l'industrie extractive, ainsi que les programmes de formation pratiques basés sur des scénarios et la constitution minutieuse d'équipes, faciliteront des améliorations directes et rapides. Des financements ciblés et des formations continues sont donc également nécessaires dans le secteur du capital humain en Europe. Ceci est d'autant plus vrai qu'une analyse publiée récemment sur environ 900 doctorants en IA en Allemagne a montré que l'UE ne joue qu'un rôle subalterne à cet égard : Les principaux pays d'origine de ces chercheurs sont la Chine, l'Inde et l'Iran ; en outre, une fois le doctorat terminé, l'Europe perd une part considérable de son expertise en IA au profit des États-Unis, où les talents sont embauchés principalement par les grandes entreprises technologiques connues.⁸¹

6 Conclusion

Alors que le monde délaisse les combustibles fossiles au profit d'alternatives plus vertes, il devient de plus en plus difficile de trouver les grandes quantités de cobalt, de lithium et d'autres métaux rares nécessaires à la fabrication des téléphones mobiles, des ordinateurs portables et des voitures électriques. Récemment, on a vu apparaître les premières start-ups capables d'automatiser la recherche de gisements minéraux potentiels à l'aide de l'IA, et donc de la rendre plus rentable et plus rapide. En même temps, il s'agit d'une approche prometteuse pour identifier les gisements éligibles à un financement, à l'intérieur et à l'extérieur de l'UE, si l'on s'assure que les systèmes sous-jacents sont formés sur des données de haute qualité et que les aspects environnementaux et les interdépendances des sites d'extraction potentiels sont pris en compte par des « humains dans la boucle ». Toutefois, l'importance des externalités de l'information dans la découverte des matières premières, l'existence d'économies d'échelle dans le développement des algorithmes et l'absence de normes techniques rendent nécessaire un soutien réglementaire intensif pour le développement du marché. La prochaine législation européenne sur les matières premières critiques devrait aborder cette question.

Cet **Input du cep** plaide en faveur d'une politique de financement ciblée de l'UE dans le domaine des méthodes d'exploration des matières premières rares basées sur l'IA. Il commence par affirmer que les possibilités techniques d'utilisation de l'IA moderne dans ce domaine ont également augmenté de manière significative ces dernières années. Elle utilise plusieurs exemples d'entreprises non européennes pour démontrer que ces techniques sont également viables pour le secteur des matières premières. Dans le même temps, l'analyse montre que les conditions réglementaires nécessaires doivent d'abord être créées pour une adoption réussie de l'IA dans le secteur minier. Sur le plan pratique, il s'agit tout d'abord de s'assurer qu'il existe une capacité de décision humaine adéquate au sein de ces systèmes automatisés. L'évaluation des gisements de matières premières ne doit jamais se

⁸¹ Maham, P., Heumann, S., Denkena, W., Hemmen, L. et Semenova, A. (2022). L'Allemagne en tant que site d'IA : Destination ou hub ? Enquête empirique sur les parcours professionnels des doctorants en IA dans les universités allemandes. SNV Policy Brief (14.12.2022).

limiter à des paramètres purement géologiques ou économiques, mais doit toujours inclure la dimension sociale et écologique. Cela rend le développement d'algorithmes et l'évaluation des résultats algorithmiques particulièrement complexes. S'assurer qu'il y a des « humains dans la boucle » augmente la fiabilité des analyses et garantit en même temps le respect des normes éthiques. Deuxièmement, le soutien de l'État sera nécessaire dans la phase initiale de développement du marché afin de réaliser plus rapidement les économies d'échelle et d'empêcher l'émergence de nouveaux monopoles extra-européens dans ce secteur.

Dans ce contexte, l'**Input du cep** formule cinq recommandations concrètes à l'intention de l'UE. Elle devrait utiliser les dispositions de la loi sur les données pour garantir que des géodonnées fiables et granulaires soient suffisamment accessibles au public. Elle devrait soutenir financièrement les start-ups d'IA prometteuses dans ce domaine, pendant la phase initiale, en plus de stimuler l'innovation européenne dans ce domaine, par exemple en utilisant des concours d'innovation. En outre, l'UE devrait définir des normes techniques et des règles de transparence pour l'utilisation de l'IA dans le secteur minier afin de réduire l'incertitude juridique et de renforcer la confiance dans ces technologies. Enfin, elle devrait lancer des programmes d'éducation et de formation ciblés à l'interface entre l'IA et les géosciences.

Cet article s'est concentré sur l'identification des ressources existantes à l'aide de nouvelles méthodes d'IA. Bien entendu, cette technologie peut également être utilisée dans de nombreux autres contextes écologiques. Par exemple, un groupe de scientifiques de l'environnement a récemment utilisé l'IA pour créer un plan visant à mettre fin au différend entre l'Égypte, l'Éthiopie et le Soudan au sujet du plus grand barrage hydroélectrique d'Afrique.⁸² Les pays tentaient sans succès, depuis le début de la construction en 2011, de se mettre d'accord sur des paramètres tels que la vitesse d'achèvement du projet et la quantité d'eau à libérer. En utilisant l'IA et des modèles climatiques, les chercheurs ont pu identifier un scénario qui équilibre les intérêts économiques et biophysiques transfrontaliers, maximise les avantages économiques et tient compte de l'impact du changement climatique. Cette recherche illustre la manière dont l'IA peut cartographier plus efficacement les incertitudes géologiques et socio-économiques, notamment celles découlant du changement climatique, et créer des solutions gagnant-gagnant indispensables à la gestion de la durabilité.

Dans le même temps, l'exploration basée sur l'IA n'est qu'un premier pas vers le renforcement de la sécurité d'approvisionnement de l'Europe dans le domaine des matières premières critiques. Les ressources identifiées doivent également être exploitées sans mettre en péril les objectifs de durabilité et les performances économiques de l'Europe. Cela nécessitera diverses autres mesures dans l'optique de l'économie circulaire, des processus administratifs et de la diplomatie des ressources. L'IA peut également être utile à cet égard, par exemple pour identifier et classer les ressources en matières premières dormantes dans les produits de consommation. Certains des instruments réglementaires nécessaires feront également l'objet d'une prochaine législation européenne concernant les matières premières critiques, que le cep continuera de suivre de près. À cet égard, il est essentiel que nous fassions un premier pas important vers un approvisionnement en matières premières à l'épreuve du

⁸² Basheer, M., Nechifor, V., Calzadilla, A. et al. (2023). Gestion adaptative coopérative du fleuve Nil avec des incertitudes climatiques et socio-économiques. *Nat. Clim. Chang.* (13), S. 48-57.

temps en Europe - ce qui inclut la reconnaissance et la promotion du potentiel de l'IA comme baguette de sourcier numérique.



Les auteurs :

Dr Anselm Küsters
Responsable de la numérisation et des nouvelles technologies
kuesters@cep.eu

Dr. André Wolf
Chef du département Innovation technologique, infrastructure et développement industriel
wolf@cep.eu

Traduction:

Mathilde Baudouin
cepfrance@cep.eu

Centrum für Europäische Politik FREIBURG | BERLIN
Kaiser-Joseph-Strasse 266 | D-79098 Freiburg
Schiffbauerdamm 40 Raum 4105/06 | D-10117 Berlin
Tel. + 49 761 38693-0

Le **Centre de Politique Européenne** FREIBURG | BERLIN, le **Centre de Politique Européenne** PARIS, et le **Centro Politiche Europee** ROMA forment le **réseau des Centres de Politique Européenne** FREIBURG | BERLIN | PARIS | ROMA.

Libre d'intérêts particuliers et neutre sur le plan politique, le réseau des centres de politique européenne fournit une analyse et une évaluation de la politique de l'Union européenne, visant à soutenir l'intégration européenne et à défendre les principes d'un système économique de marché libre.