



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada

**COMMISSION GÉOLOGIQUE DU CANADA
DOSSIER PUBLIC 9311f**

**Modèles étendus de cartes de prospectivité des minéraux
critiques au Canada pour le Ni magmatique ($\pm\text{Cu}$ $\pm\text{Co}$ $\pm\text{ÉGP}$),
le Pb-Zn de type Mississippi-Valley et le Pb-Zn à
prédominance clastique**

S.E. Zhang et M. Parsa

2025

COMMISSION GÉOLOGIQUE DU CANADA
DOSSIER PUBLIC 9311f

Modèles étendus de cartes de prospectivité des minéraux critiques au Canada pour le Ni magmatique ($\pm\text{Cu} \pm\text{Co} \pm\text{ÉGP}$), le Pb-Zn de type Mississippi-Valley et le Pb-Zn à prédominance clastique

S.E. Zhang et M. Parsa

2025

© Sa Majesté le Roi du chef du Canada, représenté par le ministre des Ressources naturelles, 2025

Le contenu de cette publication ou de ce produit peut être reproduit en tout ou en partie, et par quelque moyen que ce soit, sous réserve que la reproduction soit effectuée uniquement à des fins personnelles ou publiques mais non commerciales, sans frais ni autre permission, à moins d'avis contraire.

On demande seulement :

- de faire preuve de diligence raisonnable en assurant l'exactitude du matériel reproduit;
- d'indiquer le titre complet du matériel reproduit et le nom de l'organisation qui en est l'auteur;
- d'indiquer que la reproduction est une copie d'un document officiel publié par Ressources naturelles Canada (RNCAN) et que la reproduction n'a pas été faite en association avec RNCAN ni avec l'appui de celui-ci.

La reproduction et la distribution à des fins commerciales sont interdites, sauf avec la permission écrite de RNCAN. Pour de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec RNCAN à copyright-droitdauteur@nrcan-rncan.gc.ca.

On peut télécharger cette publication gratuitement à partir du Dépôt ouvert des sciences et technologie de RNCAN (<https://ostrnrcan-dostrncan.canada.ca/>).

Notation bibliographique conseillée

Zhang, S.E. et Parsa, M., 2025. Modèles étendus de cartes de prospectivité des minéraux critiques au Canada pour le Ni magmatique ($\pm\text{Cu} \pm\text{Co} \pm\text{ÉGP}$), le Pb-Zn de type Mississippi-Valley et le Pb-Zn à prédominance clastique; Commission géologique du Canada, Dossier public 9311, 1 fichier .zip. <https://doi.org/10.4095/p7rn62c7b3>

Les publications de cette série ne sont pas révisées; elles sont publiées telles que soumises par l'auteur.

ISSN 2816-7163
ISBN 978-0-660-79456-3
N° de catalogue M183-2/9311F-PDF
<https://doi.org/10.4095/p7rn62c7b3>

Table des Matières

1	Introduction	2
2	Données	4
3	Méthode	5
4	Résultats	6
4.1	Ni magmatique ($\pm\text{Cu} \pm\text{Co} \pm\text{ÉGP}$)	6
4.2	Pb-Zn de type MVT	10
4.3	Pb-Zn de type PC	17
5	Conclusion	24

Table des figures

1	Performances variables et spatiales de l'ensemble profond pour le Ni magmatique ($\pm\text{Cu} \pm\text{Co} \pm\text{ÉGP}$)	7
2	Comparaison des informations de ciblage originales fournies par un modèle unique et de l'ensemble profond de modèles pour le Ni magmatique ($\pm\text{Cu} \pm\text{Co} \pm\text{ÉGP}$)	7
3	Carte de prospectivité haute résolution pour le Ni magmatique ($\pm\text{Cu} \pm\text{Co} \pm\text{ÉGP}$)	8
4	Incertitude des données de ciblage pour le Ni magmatique ($\pm\text{Cu} \pm\text{Co} \pm\text{ÉGP}$)	9
5	Performance Pb-Zn variable et spatiale de l'ensemble profond pour le Pb-Zn du type MVT	10
6	Comparaison des informations de ciblage originales fournies par un modèle unique et d'un ensemble profond de modèles pour Pb-Zn de type MVT en Amérique du Nord	11
7	Carte de prospectivité alternative à haute résolution pour Pb-Zn de type MVT	12
8	Comparaison des informations de ciblage originales fournies par un modèle unique et le modèle étendu pour Pb-Zn de type MVT en Australie	13
9	Carte de prospectivité alternative à haute résolution pour Pb-Zn de type MVT	14
10	Incertitude des informations de ciblage pour Pb-Zn de type MVT	15
11	Incertitude des informations de ciblage pour Pb-Zn de type MVT	16
12	Performances variables et spatiales de l'ensemble profond pour le Pb-Zn de type PC	17
13	Comparaison des informations de ciblage originales fournies par un modèle unique et un ensemble approfondi de modèles pour Pb-Zn de type PC en Amérique du Nord	18
14	Carte de prospectivité à haute résolution pour Pb-Zn de type PC en Amérique du Nord	19
15	Comparaison des informations de ciblage originales fournies par un modèle unique et le modèle étendu pour Pb-Zn de type PC en Australie	20
16	Carte de prospectivité à haute résolution pour Pb-Zn de type PC en Australie	21
17	Incertitude des informations de ciblage pour Pb-Zn de type PC en Amérique du Nord	22
18	Incertitude des informations de ciblage pour Pb-Zn de type PC en Australie	23

Modèles étendus de cartes de prospectivité des minéraux critiques au Canada pour le Ni magmatique ($\pm\text{Cu} \pm\text{Co} \pm\text{ÉGP}$), le Pb-Zn de type Mississippi-Valley et le Pb-Zn à prédominance clastique

Sommaire

Ce rapport présente des modèles de prospectivité étendus à l'échelle canadienne pour les systèmes minéraux Ni magmatique ($\pm\text{Cu} \pm\text{Co} \pm\text{ÉGP}$), Pb-Zn de type Mississippi-Valley (MVT) et Pb-Zn à prédominance clastique (PC). Ces modèles sont des agrégations d'ensembles profonds, conçus pour refléter la diversité des approches entre praticiens et pour intégrer l'incertitude induite par les flux de travail. Contrairement aux modèles inauguraux, ils ne reposent pas sur un seul flux de travail, mais sur des propriétés statistiques d'ensembles larges et décorrélés. Par rapport aux modèles initiaux, ces modèles étendus offrent une expansion des zones cibles en terrains vierges ('greenfield'), apportant ainsi de nouvelles perspectives de ciblage. Pour le Ni magmatique, les covariables ont été mises à jour avec une résolution spatiale plus élevée, et le système d'indexation spatiale a été standardisé. Les ensembles de données contenant les résultats de prédiction pour le Ni magmatique sont disponibles pour le Canada, tandis que les résultats pour les cibles Pb-Zn de type MVT et PC couvrent l'Amérique du Nord et l'Australie. Des échantillons positifs pour le Ni magmatique, ré-indexés selon le système H3, sont également inclus dans cette publication en forme de données.

1 Introduction

Ce rapport présente des modèles de prospectivité étendus pour les systèmes minéraux Ni magmatique ($\pm\text{Cu} \pm\text{Co} \pm\text{ÉGP}$), de Pb-Zn de type Mississippi-Valley (MVT) et de Pb-Zn à prédominance clastique (PC). Les premiers travaux de modélisation de la prospectivité minérale (MPM) pour ces systèmes ont été réalisés par [Lawley et al. \(2021\)](#) et [Lawley et al. \(2022\)](#). Les différences entre les modèles présentés ici et les modèles inauguraux sont : (1) une expansion des zones cibles grâce à une méthode d'ensemble profond ; (2) une résolution spatiale accrue pour les covariables du Ni magmatique ; et (3) l'inclusion d'une analyse d'incertitude. Ce rapport résume les principaux changements méthodologiques et les résultats, et fournit une diffusion de données des prédictions de prospectivité.

L'avantage principal des modèles étendus est l'expansion des zones cible ainsi que l'analyse d'incertitude, qui résultent de l'utilisation d'une méthode d'ensemble profond qui crée délibérément une diversité de modèles d'apprentissage automatique (AA) individuels. Dans la MPM à modèle unique, un seul modèle parmi quelques candidats est publié. Cependant, de nombreux modèles sont possibles en fonction de la mise en œuvre heuristique du flux de travail de la science des géodonnées. La méthode d'ensemble profond aborde deux problèmes associés à la validité scientifique et statistique des modèles de MPM ([Nwaila et al., 2024](#); [Zhang et al., 2024, 2025a](#)) : (1) un manque de validation post-hoc couplé à des changements rapides de méthodologie ; et (2) des déficiences dans le cadre de la science des géodonnées.

En (1), comme de nombreux algorithmes d'AA sont conçus pour créer des modèles dont l'expressivité peut être illimitée (par exemple, des approximateurs de fonction universels), les modèles peuvent devenir surajustés et ainsi capturent des informations statistiquement erronées ou du bruit. Le cycle de vie typique des modèles en science des données consiste à effectuer une validation à l'aide de retours d'expérience pendant le déploiement, car c'est à ce stade que les modèles font les inférences les plus volumineuses et que, par conséquent, les performances observées sont les plus statistiquement robustes. C'est ce qui est attendu dans le domaine des mégadonnées. Comme tout modèle statistique, les modèles d'AA n'ont pas de valeur intrinsèque,

mais seulement une valeur pratique pendant le déploiement, où les inférences sur les flux de données entrants peuvent être testées. La valeur des modèles d'AA n'est donc connue que pendant le déploiement (par exemple, la levée ou le gain du modèle). Pour la MPM, c'est impossible. Le même problème existe dans les prévisions météorologiques ou climatiques, car les prévisions de l'avenir ne peuvent pas être validées avant la date prévue. La solution consiste à créer de nombreux modèles décorrélés et d'agréger le résultat, ce qui est similaire aux mesures répétées en métrologie. La méthode d'ensemble profond module la complexité du modèle, qui se situe le long d'un spectre allant du sur-ajustement au sous-ajustement, en fonction des choix de flux de travail (par exemple, la dimensionnalité des caractéristiques). Les modèles sur-ajustés fournissent des informations de ciblage supplémentaires minimales, car ils obtiennent des scores élevés, mais ne représentent spatialement les cibles qu'à proximité des échantillons positifs, ce qui équivaut à des zones déjà exploitées (ou connues). Les modèles relativement sous-ajustés fournissent davantage de cibles de type 'greenfield' (terrains vierges), avec la mise en garde évidente qu'ils peuvent être plus spéculatifs. La nature de l'ensemble profond garantit qu'une sous-population de modèles au sein de chaque ensemble pour chaque système minéral ciblé est comparable aux modèles initiaux. Ces modèles ne contribuent pas à de nouvelles zones cibles. Le reste ajoute des informations de ciblage novatrices.

En (2), il existe une grave déficience dans le cadre de la science des géodonnées qui résulte d'une extension spatiale post-hoc du cadre de la science des données avec des composants supplémentaires qui examinent les performances spatiales des modèles après le déploiement (Zhang et al., 2024). Le cadre de la science des géodonnées est une extension spatiale naissante d'à partir du cadre de la science des données, qui est nécessaire car le cadre de la science des données est entièrement aspatial. Les concepts statistiques tels que les tests 'hors échantillon' en science des données n'ont pas d'équivalents géostatistiques bien définis ou uniques (Hoffmann et al., 2021). Le problème principal est que les systèmes géologiques tels que les gisements minéraux sont formés par un déséquilibre thermodynamique, ce qui fait de leur état (par exemple, la minéralisation ou non) un système dynamique complexe, dont les proxys sont distribués de manière fractale (Zuo, 2016). Cela signifie que deux zones de complexité géologique différente ne peuvent pas être comparées de manière statistiquement rigoureuse (par exemple, elles ont des portées de corrélation spatiale différentes ou, de manière équivalente, une diversité de caractéristiques spatialement variable), ce qui signifie que les tests hors échantillon, tels que la validation croisée, ne peuvent pas être statistiquement robustes sans égaliser la complexité des populations dans et hors échantillons. Une conséquence majeure d'un cadre de science des géodonnées étendu spatialement post-hoc est que les modèles sont réglés séquentiellement dans le domaine des variables (par exemple, en maximisant les métriques aspatiales, telles que le score F1), puis dans le domaine spatial (par exemple, en évaluant la fraction des sites jugés positifs et en sélectionnant les modèles). Cependant, l'objectif de la MPM est distinctement un domaine conjoint, qui nécessite une maximisation simultanée des performances du modèle dans les domaines spatial et aspatial. Cela résulte d'une formulation de tâche idiosyncrasique en science des géodonnées, car l'exploration minière ne peut pas être formulée en tâches d'AA pures, car elle est menée et budgétisée spatialement et non sur la base des covariables d'AA utilisées pour la modélisation. Par conséquent, les critères spécifiés par le client ne peuvent pas être intégrés a priori dans une tâche d'AA pure, ce qui dicterait autrement la conception et l'expérimentation du flux de travail. Par exemple, un modèle précis n'est pas pertinent pour le ciblage, s'il ne réduit pas suffisamment la zone cible pour rendre l'exploration réalisable ou ne produit pas de nouvelles zones cibles (par exemple, extraire des cibles 'greenfield' authentiques nouvelles d'à partir des données). Inversement, un modèle qui réduit une zone cible dans une mesure acceptable n'est pas utile s'il n'est pas suffisamment précis. Comme les modèles sont optimisés séquentiellement dans la MPM piloté par les données, il existe toujours des modèles équiprobables - ceux qui se comportent de manière similaire selon les métriques de la science des données (par exemple, le score F1) mais qui présentent une gamme de caractéristiques spatiales.

L'interaction de (1) et (2) rend la notion d'un modèle de la MPM unique et optimal indéfinie. De plus, tenter d'atteindre un seuil de performance de modèle au sens d'AA ne fait que créer un ensemble équiprobable de modèles spatialement différents. Ce type d'incertitude a été nommé incertitude 'induite par le flux de travail'.

Cela est aggravé par un manque de critère d'acceptation dans la MPM, qui est requis pour les produits typiques pilotés par les données. Dans les produits de la MPM publiés, il n'existe pas de tel critère car les utilisateurs des produits de la MPM sont généralement inconnus ou supposés et les cibles sont principalement publiées en tant que produits académiques (par exemple, des articles). Si le budget d'exploration et la tolérance au risque des utilisateurs finaux sont inconnus, il n'y a pas de contraintes de conception pour les produits de la MPM non commerciaux.

Cette mise à jour fournit une diversité de modèles équiprobables pour une gamme de seuils de performance d'une manière conjointe. Les modèles initiaux publiés peuvent être considérés comme se trouvant dans la partie droite de la distribution de performance des modèles, à l'exception de la cible de Ni magmatique, qui utilise des covariables à plus haute résolution dans le modèle présenté ici. Par conséquent, le modèle initial de Ni magmatique ne peut pas être strictement comparé au modèle étendu. Le but des modèles présentés ici est de capturer l'ensemble de la distribution de performance, en particulier en capturant des modèles moins complexes (par exemple, ceux résultant de la régression logistique), qui se comportent de manière plus similaire aux modèles traditionnels basés sur la connaissance, sur la base de comparaisons entre les modèles de la MPM basés sur la connaissance et pilotés par les données (par exemple, [Lawley et al. 2021](#)). Les zones cibles supplémentaires offertes par cette mise à jour doivent être considérées comme des réalisations alternatives des cibles de la MPM, similaires, mais plus larges, aux simulations conditionnelles en géostatistique ou aux modèles de la MPM basés sur la connaissance (par exemple, les poids de l'évidence). Les zones de ciblage supplémentaires sont destinées à promouvoir l'exploration de type greenfield.

2 Données

Les données de covariables utilisées pour le Ni magmatique ($\pm\text{Cu} \pm\text{Co} \pm\text{ÉGP}$) proviennent de [Bourdeau and Lawley \(2025\)](#). Le cube de données a été initialement construit pour la modélisation de la prospectivité du graphite au Canada, mais son contenu informationnel est identique à celui du cube de données pour le système minéral Ni magmatique ($\pm\text{Cu} \pm\text{Co} \pm\text{ÉGP}$) ([Lawley et al., 2021](#)), en raison du chevauchement substantiel de leurs composantes de système minéral. La lignée de données du cube de données sur le graphite remonte aux mêmes origines que celle du Ni magmatique ($\pm\text{Cu} \pm\text{Co} \pm\text{ÉGP}$), mais la résolution de l'indexation spatiale a été améliorée. L'indexation spatiale originale dans l'étude initiale était arbitraire, et elle a été remplacée par le H3 Discrete Global Grid System (DGGS). Le H3 DGGS est un logiciel open-source développé par [Uber Technologies Inc. \(2020\)](#), qui comporte des cellules de grille presque entièrement hexagonales, également hiérarchiques (par exemple, l'amalgame spatial est basé sur des entiers). Chaque cellule est indexée par son adresse H3 unique. Le système offre une couverture mondiale complète à plusieurs résolutions. Le cube de données présenté dans ce rapport utilise la résolution 7 du H3 DGGS, ce qui donne 98 825 162 adresses H3 uniques dans le monde entier. À cette résolution, l'hexagone moyen couvre une superficie de 5,16 km², avec une longueur de bord moyenne de 1,22 km. Cette résolution est suffisante pour des applications à la fois nationales et régionales, dans le but de guider l'exploration minière. Le H3 DGGS bénéficie de sa large adoption dans la navigation et la cartographie, principalement parce qu'il est au maximum isotrope. Cela élimine la distorsion spatiale associée aux systèmes de grille anisotropes et facilite la compréhension visuelle des distances de cellule à cellule et de la continuité des objets. L'optimisation de la représentation de la continuité et de la connectivité spatiales est bénéfique pour la cartographie d'objets géoscientifiques, tels que les failles, rivières, limites des cratons et les étendues de zones prometteuses de forme irrégulière.

Pour les systèmes minéraux Pb-Zn MVT et PC, les couches preuves sont les mêmes. La résolution de certaines couches preuves utilisées dans les études initiales sur les systèmes minéraux Pb-Zn MVT et PC n'ont pas la résolution la plus élevée disponible au moment de la rédaction de ce rapport. Ceci est car le cube de données a été choisi pour fournir une couverture transcontinentale compte tenu de la portée de l'étude et de

la source des données annotées. Une partie significative des données d’entraînement pour les systèmes MVT et PC est située à l’extérieur du Canada, ce qui rend les couches de preuves à haute résolution spécifiques au Canada inutilisables. Dans cette mise à jour itérative, nous préservons le cube de données tel qu’il a été publié pour continuer à fournir des mises à jour pour les systèmes minéraux MVT et PC pour le Canada et ses partenaires stratégiques (les États-Unis et l’Australie).

Les résultats indexés spatialement (scores de prospectivité et incertitude mesurée à l’aide de l’écart type) sont diffusés dans ce rapport. Les entrées de la diffusion de données sont indexées à l’aide de l’adresse H3 (une valeur de hachage alphanumérique), qui est la clé principale. Aucun autre nouveau jeu de données n’est diffusé dans ce rapport et les lecteurs sont dirigés vers les publications originales pour accéder aux cubes de données originaux pour des jeux de données supplémentaires (par exemple, les covariables). Les archives de données sont compressées ensemble. Une fois décompressées, il y a deux fichiers au format csv (comma-separated-values). Le premier fichier est nommé “Ni_v1_2025.csv” et contient les résultats de prédiction pour le Ni magmatique ($\pm\text{Cu} \pm\text{Co} \pm\text{ÉGP}$) au Canada et les échantillons positifs indexés spatialement. Le deuxième fichier est nommé “Pb_Zn_v1_2025.csv” et contient les résultats de prédiction pour les systèmes MVT et PC Pb-Zn à travers l’Amérique du Nord et de l’Océanie. La partie “v1” des noms de fichiers indique la version un du jeu de données et facilite la traçabilité des données.

3 Méthode

La méthode utilisée dans cette étude est la principale source de différence entre les modèles présentés ici et les modèles initiaux. Elle a d’abord été développée pour comprendre l’incertitude dans [Zhang et al. \(2024\)](#), a été conçue comme une méthode applicable dans [Nwaila et al. \(2024\)](#) et a ensuite été révisée et déployée pour l’exploration du graphite au Canada dans [Zhang et al. \(2025b\)](#). Les détails techniques et l’historique des révisions sont substantiels et dépassent le but de ce rapport. Les lecteurs intéressés par les détails du flux de travail et la justification sont invités à se référer aux publications originales. Ici, nous fournissons un bref résumé. Le flux de travail a été conçu pour propager l’incertitude due aux différences de mise en œuvre rencontrées dans la cartographie de la MPM. Les sources d’incertitude dues aux choix des composants du flux de travail qui ont été bien étudiées à ce jour comprennent : (1) l’annotation négative ; (2) la dimensionnalité de l’espace des caractéristiques ; (3) l’algorithme d’AA ; et (4) la métrique de réglage des hyperparamètres. Pour chaque composante, la modulation est destinée à produire une diversité de modèles. La modulation des composantes du flux de travail crée différents modèles, dont la dispersion statistique permet de propager l’incertitude induite par le flux de travail.

Puisque les modèles de prospectivité ne peuvent pas être raisonnablement validés à l’aide de retours d’expérience, contrairement aux modèles typiques de mégadonnées, car le forage est coûteux, risqué et que ça prend du temps, une validation par anticipation a été proposée par [Zhang et al. \(2024\)](#) comme solution de contournement. À ce jour, la validation par anticipation comporte deux composantes : (1) capturer la tendance centrale de nombreux modèles décorrélés, ce qui est similaire à l’amélioration des mesures en répétant les tentatives et en faisant la moyenne des résultats ; et (2) des cibles de validation a priori, nommées ‘cibles de référence certifiées’ (CRC), dont l’effet sur les flux de travail ou les méthodes est similaire à l’étalonnage des instruments à l’aide de matériaux de référence certifiés. En traitant la modulation des composants du flux de travail dans la propagation de l’incertitude induite par le flux de travail comme un décorrélateur de modèle, les modèles résultants constituent un ensemble et peuvent être agrégés. Ce type d’ensemble est appelé ‘ensemble profond’ car plusieurs composants du flux de travail sont variés. L’ensemble profond imite le résultat d’un groupe de praticiens de la MPM, de manière similaire à l’utilisation d’ensembles pour capturer la condition initiale et la variabilité heuristique dans les prévisions météorologiques ou climatiques ([Krishnamuri et al., 2000](#); [Maqsood et al., 2004](#); [Gneiting and Raftery, 2005](#)). Les moments statistiques de l’ensemble sont beaucoup plus robustes

que ceux des modèles individuels. La moyenne de l'ensemble représente le consensus scientifique et l'écart type la dissidence. Les CRC sont des systèmes minéraux incontestables, bien étudiés et largement explorés, dont les empreintes peuvent être mieux comparées aux connaissances existantes. Les CRC permettent de comparer objectivement les méthodes de la MPM, et de les valider dans la mesure du possible (par exemple, les méthodes produisant des modèles physiquement irréalistes sont rejetées). Le flux de travail de l'ensemble profond a été validé dans [Nwaila et al. \(2024\)](#) à l'aide de deux CRC, soit le système magmatique du Complexe du Bushveld et le système sédimentaire modifié du Bassin du Witwatersrand (Afrique du Sud). Pour les modèles présentés ici, tous les composants du flux de travail, y compris les grilles d'hyperparamètres, sont délibérément choisis pour être identiques à ceux utilisés dans [Zhang et al. \(2025b\)](#), car la méthode est un contrôle expérimental au stade du déploiement du modèle.

Dans le cadre de la formulation du déploiement, un critère d'acceptation spatiale a été créé dans [Nwaila et al. \(2024\)](#) – les modèles qui ne distinguent pas adéquatement entre les échelles d'exploration et de reconnaissance sont considérés comme excessivement sur-ajustés. La distinction est basée sur une heuristique d'ordre de grandeur selon laquelle la reconnaissance doit se produire à une échelle spatiale qui est au moins un ordre de grandeur plus grande que l'exploration, ce qui rend les produits de la MPM significatifs. Les modèles au sein de tout ensemble profond qui ne satisfont pas à ce critère sont rejetés lors de l'agrégation. De plus, afin de mesurer conjointement les performances des modèles dans les domaines des variables et des espaces, une nouvelle métrique de performance a été créée – la métrique variable-spatiale (VS). Il s'agit techniquement d'une métrique composite qui se compose de deux métriques indépendantes, similaires à la densité normalisée. Les deux métriques indépendantes sont le score F1 et la sélectivité spatiale, qui est un moins la fraction de tous les sites jugés prometteurs. La forme du produit de la métrique VS est limitée en portée, ce qui lui permet d'être utilisée comme un poids pour effectuer la fusion des modèles (agrégation de l'ensemble). L'agrégation pondérée des flux de travail décorrélés (chacun produisant un modèle) à l'aide d'une métrique de domaine conjoint est statistiquement liée au bagging et au boosting, qui sont des concepts généralement limités à l'algorithme d'AA. La méthode de l'ensemble profond est donc similaire au bagging et rappelle le boosting, mais au niveau du flux de travail et de manière conjointe (par exemple, les modèles qui sont plus performants spatialement se voient attribuer plus de poids).

Les échantillons positifs pour le Ni magmatique ($\pm\text{Cu} \pm\text{Co} \pm\text{ÉGP}$) ont été ré-indexés dans le H3 DGGS en utilisant le centroïde des cellules originales. Pour les autres systèmes minéraux, les échantillons positifs consistaient en une combinaison de gisements et d'occurrences, selon les études initiales. L'évaluation des performances a été menée dans les domaines des variables et des espaces à l'aide du score F1 (pondéré), de la zone-sous-la-courbe de la caractéristique de fonctionnement du récepteur (en anglais : 'area-under-the-curve of the receiver-operating-characteristic' ou AUC-ROC), de la fraction des sites prometteurs et de la métrique VS.

4 Résultats

4.1 Ni magmatique ($\pm\text{Cu} \pm\text{Co} \pm\text{ÉGP}$)

La carte de prospectivité pour le Ni magmatique ($\pm\text{Cu} \pm\text{Co} \pm\text{ÉGP}$) a été créée à partir d'un total de 2 000 modèles. Aucun modèle n'a été rejeté en raison d'un sur-ajustement excessif. Le score AUC-ROC des modèles de l'ensemble est généralement supérieur au score F1 (Fig. 1a). Le couplage entre le domaine spatial et le domaine des variables est bruité, bien que statistiquement, les scores plus élevés des modèles dans le domaine des variables soient corrélés à une meilleure performance spatiale (Fig. 1b). En comparaison avec le modèle initial, la carte de prospectivité montre que le contraste entre les régions non prospectives et prospectives est plus net et que des zones cibles supplémentaires sont devenues disponibles (Figs. 2, 3). Cette augmentation est favorable à l'exploration canadienne du Ni magmatique ($\pm\text{Cu} \pm\text{Co} \pm\text{ÉGP}$). La carte de prospectivité (Fig. 3)

est une carte complémentaire à la carte d'incertitude (Fig. 4). Elle représente le degré de désaccord entre tous les modèles.

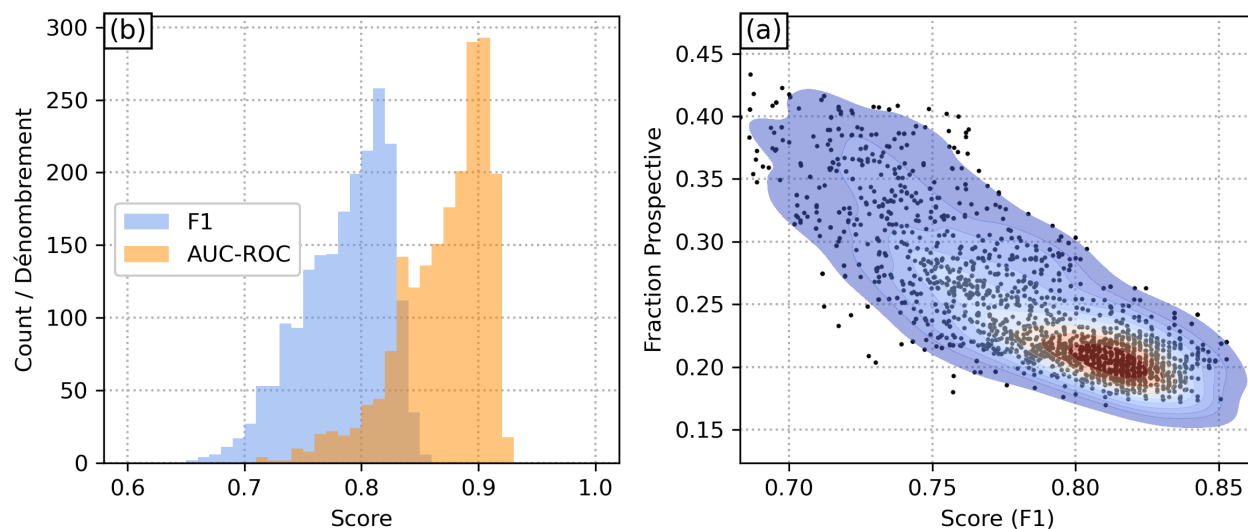


FIGURE 1. Performances variables et spatiales d'un ensemble profond pour le Ni magmatique ($\pm\text{Cu} \pm\text{Co} \pm\text{ÉGP}$). Les performances de l'ensemble sont présentées sous forme d'histogramme (a) et de dispersion (b).

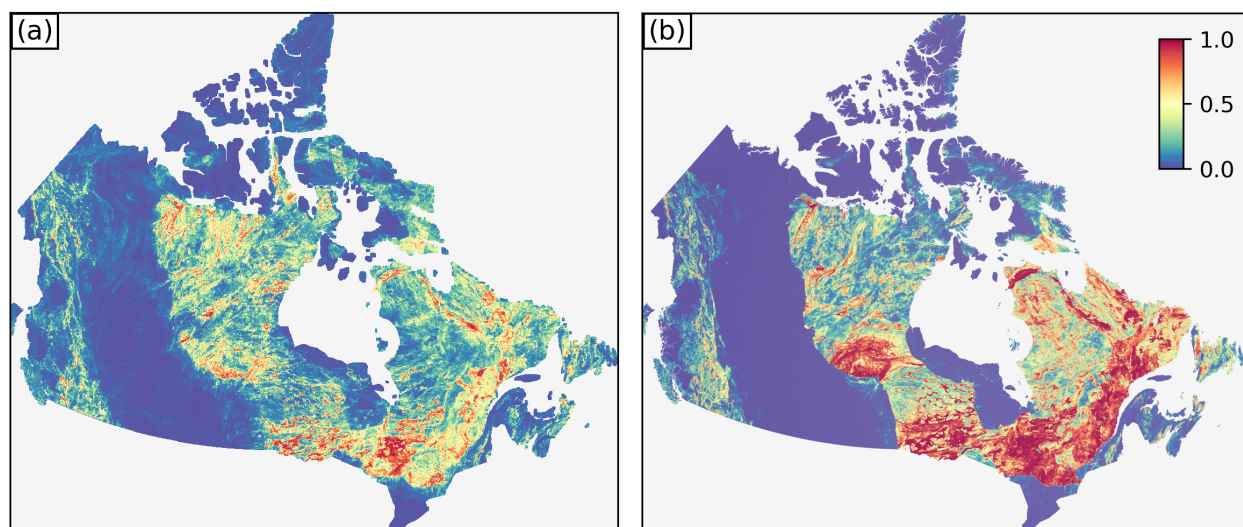


FIGURE 2. Comparaison des informations de ciblage originales fournies par un modèle unique (a) et d'un ensemble profond de modèles (b) pour le système minéral Ni magmatique ($\pm\text{Cu} \pm\text{Co} \pm\text{ÉGP}$) au Canada. La projection utilisée est celle du système Lambert de l'Atlas canadien.

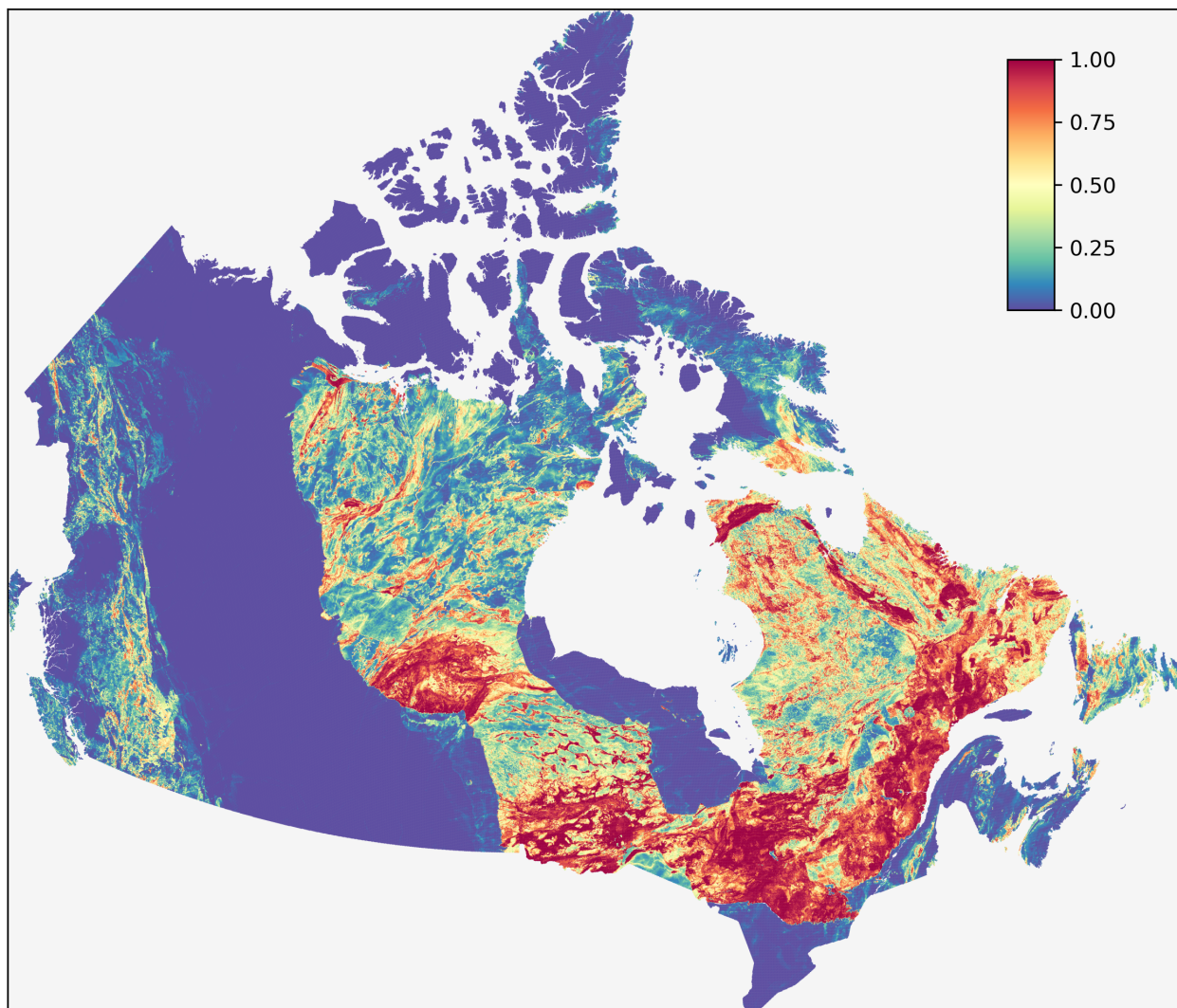


FIGURE 3. Version haute résolution de la carte de prospectivité du système minéral Ni magmatique ($\pm\text{Cu} \pm\text{Co} \pm\text{ÉGP}$). La projection utilisée est celle du système Lambert de l'Atlas canadien.

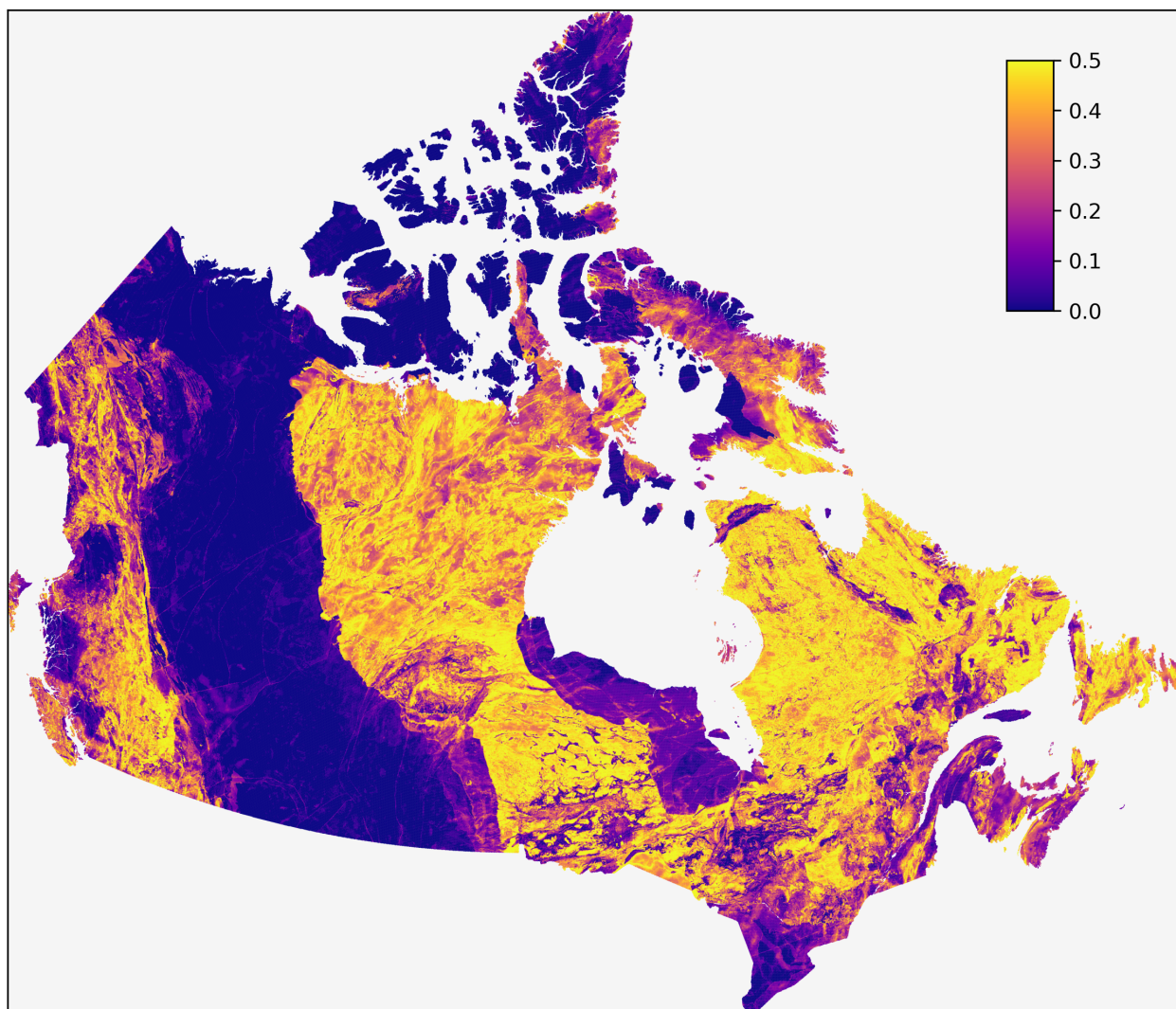


FIGURE 4. Incertitude des données de ciblage pour le système minéral Ni magmatique ($\pm\text{Cu} \pm\text{Co} \pm\text{ÉGP}$) au Canada. L'écart type de l'ensemble est utilisé comme mesure de dispersion. La projection utilisée est celle du système Lambert de l'Atlas canadien.

4.2 Pb-Zn de type MVT

La carte de prospectivité pour le Pb-Zn de type MVT a été créée à partir d'un total de 2 000 modèles. Aucun modèle n'a été rejeté en raison d'un sur-ajustement excessif. Le score AUC-ROC des modèles de l'ensemble est généralement supérieur au score F1 (Fig. 5a). Le couplage entre le domaine spatial et le domaine des variables est bruité, bien que statistiquement, les scores plus élevés des modèles dans le domaine des variables soient corrélés à une meilleure performance spatiale (Fig. 5b). En comparaison avec le modèle initial, la carte de prospectivité montre qu'une zone substantielle de cibles de type greenfield est devenue disponible (Figs. 6, 7). Cette augmentation est favorable à l'exploration canadienne du Pb-Zn de type MVT car le modèle initial n'avait pas révélé un potentiel élevé de minéralisation au Canada. La comparaison est également valable pour l'Australie (Figs. 8, 9). Les cartes de prospectivité (Figs. 7, 9) sont des cartes complémentaires aux cartes d'incertitude (Figs. 10, 11, respectivement). Elles représentent le degré de désaccord entre tous les modèles.

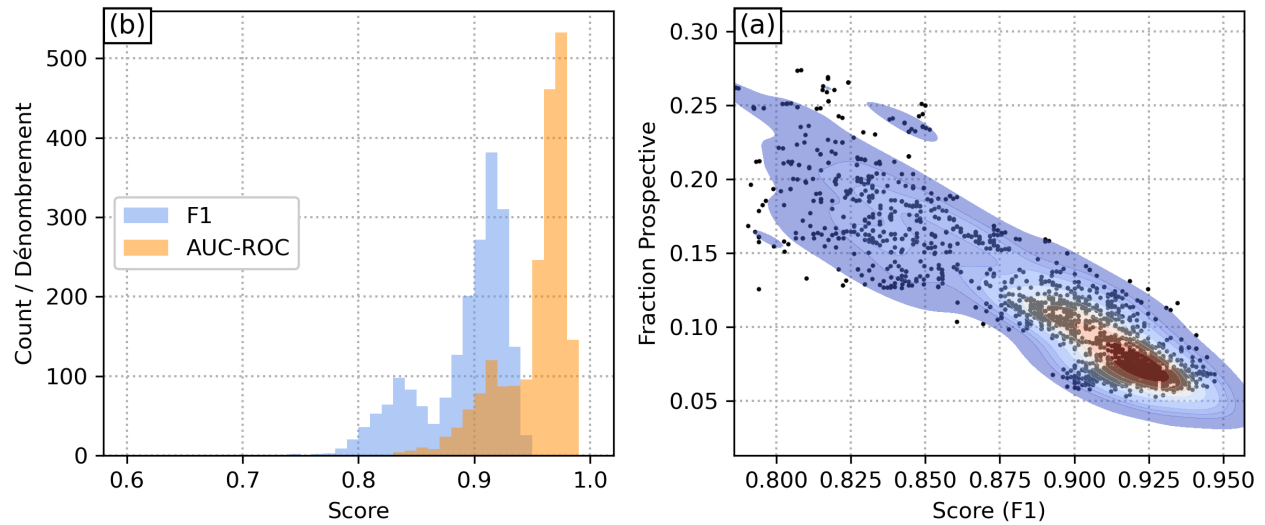


FIGURE 5. Performance variable et spatiale de l'ensemble profond pour Pb-Zn du type MVT. La performance de l'ensemble est représentée sous forme d'histogramme (a) et de dispersion (b).

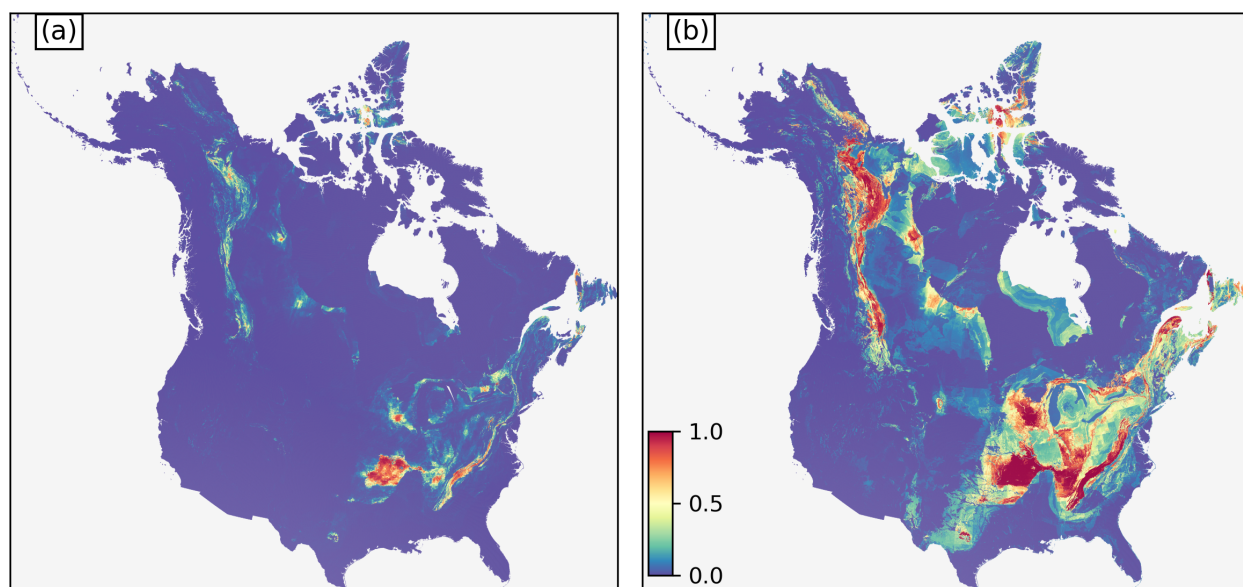


FIGURE 6. Comparaison des informations de ciblage originales fournies par un modèle unique et d'un ensemble profond de modèles pour Pb-Zn de type MVT en Amérique du Nord. La projection utilisée est celle du système Lambert de l'Atlas canadien.

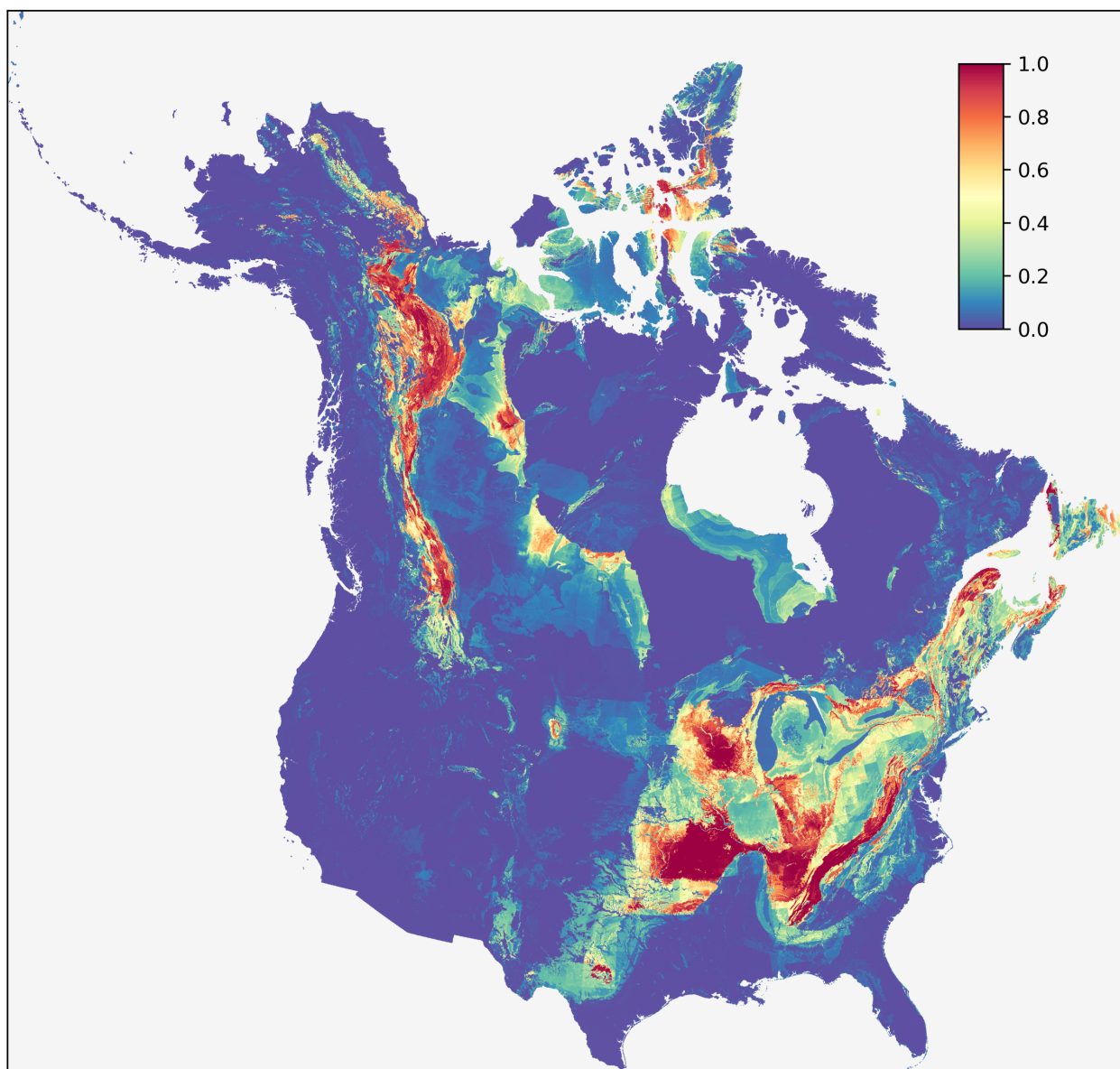


FIGURE 7. Version haute résolution de la carte de prospectivité alternative du système minéralisé Pb-Zn de type MVT. La projection utilisée est celle du système Lambert de l'Atlas canadien.

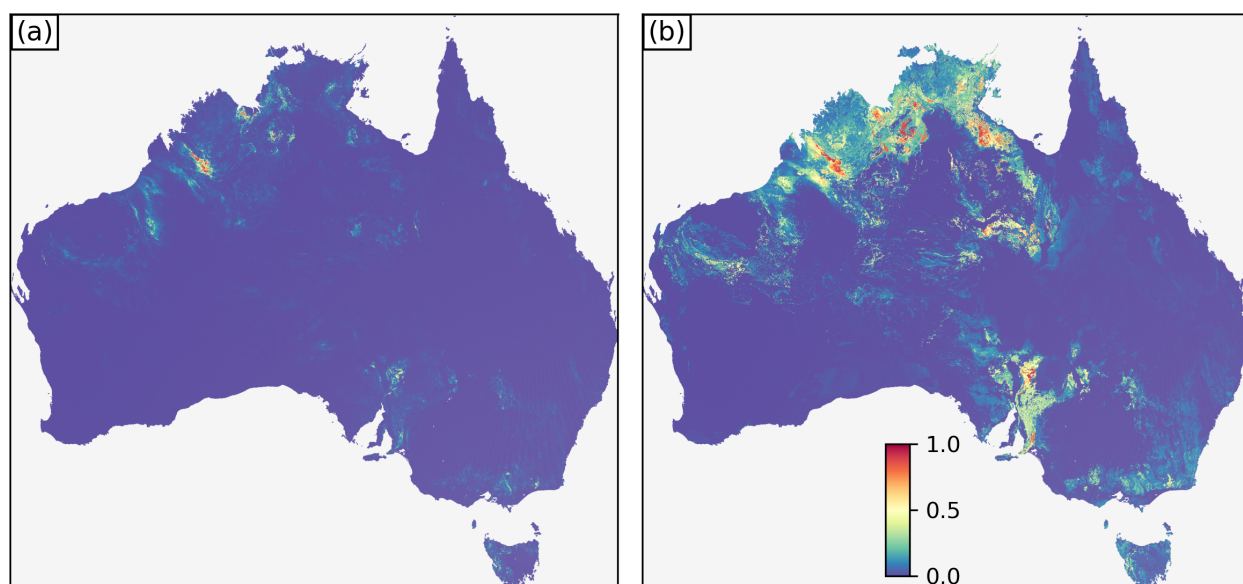


FIGURE 8. Comparaison des informations de ciblage originales fournies par un modèle unique et le modèle étendu pour Pb-Zn de type MVT en Australie. Les coordonnées sont affichées en WGS84 sans projection.

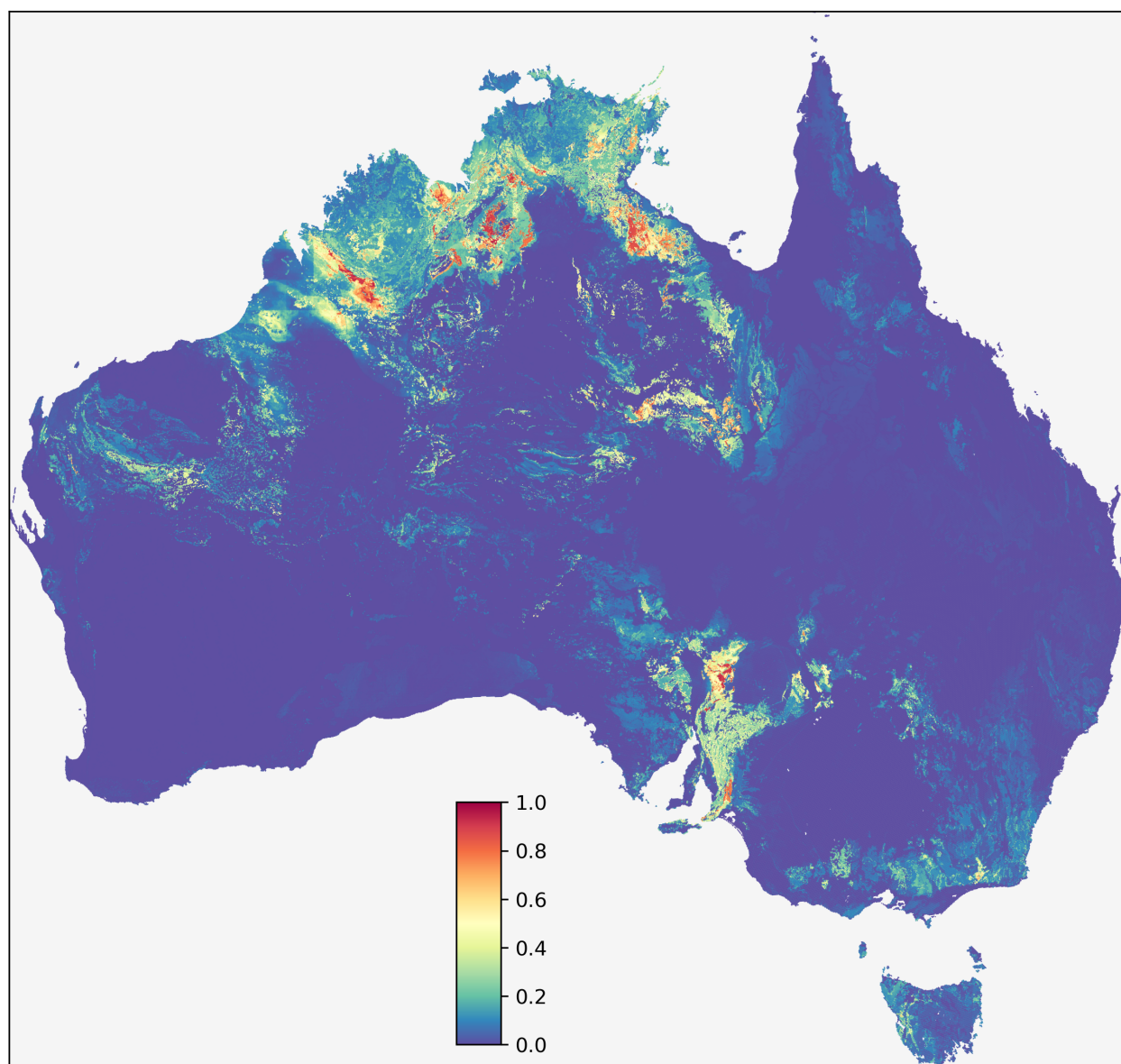


FIGURE 9. Version haute résolution de la carte de prospectivité alternative du système minéralisé Pb-Zn de type MVT en Australie. Les coordonnées sont affichées en WGS84 sans projection.

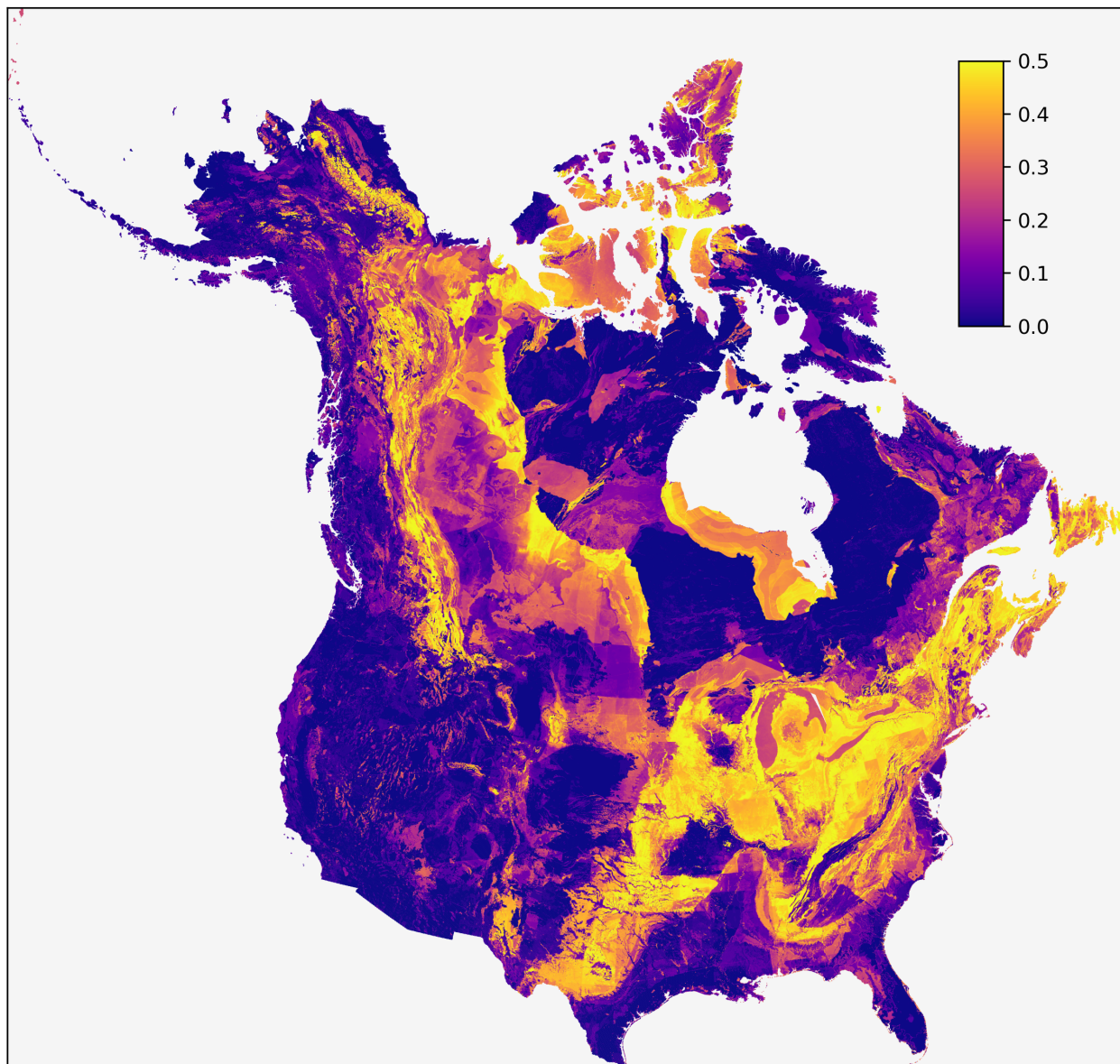


FIGURE 10. Incertitude des données de ciblage pour le système minéralisé Pb-Zn de type MVT au Canada. L'écart type de l'ensemble est utilisé comme mesure de dispersion. La projection utilisée est celle du système Lambert de l'Atlas canadien.

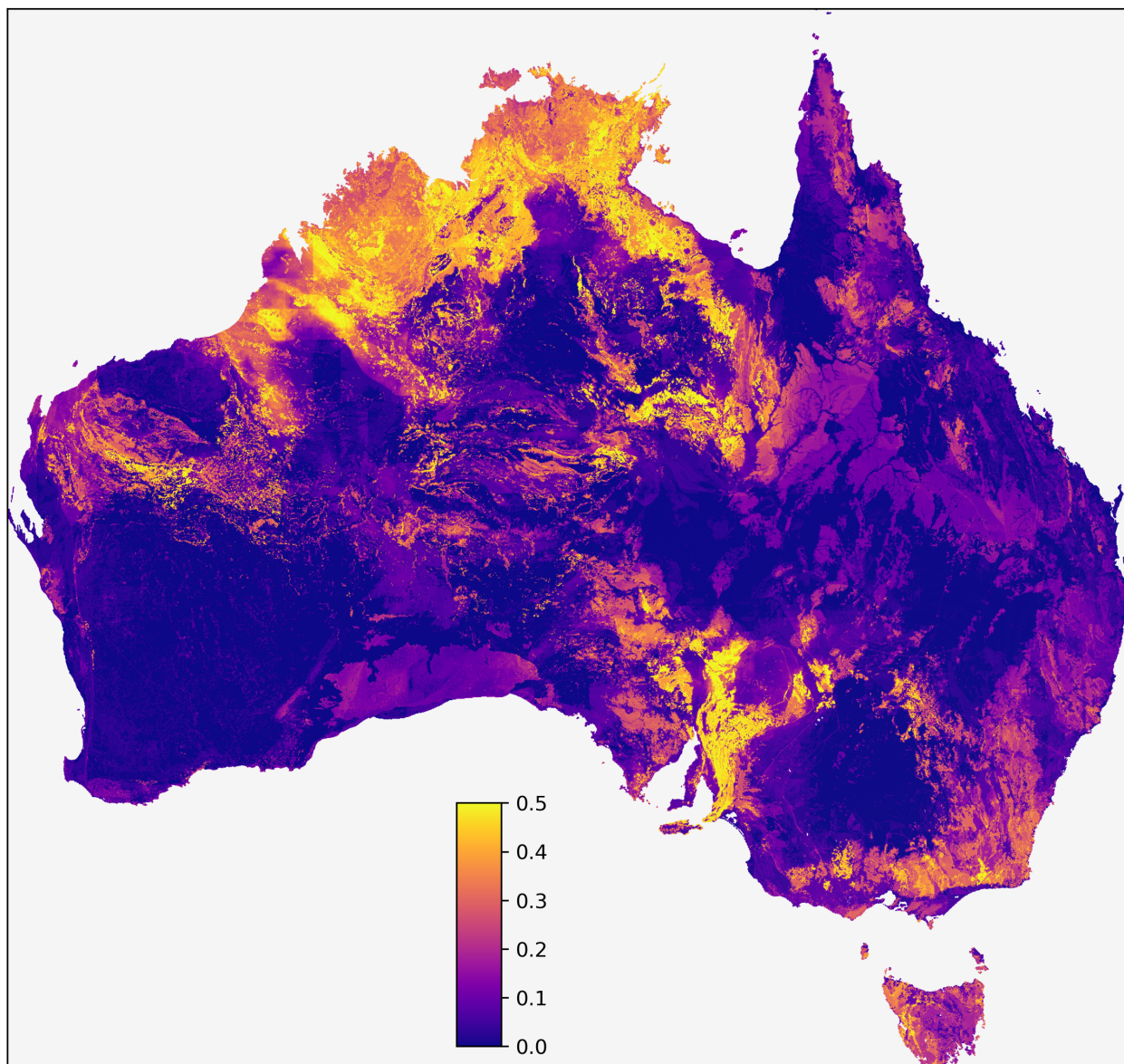


FIGURE 11. Incertitude des informations de ciblage pour le système minéral Pb-Zn de type MVT en Australie. L'écart type de l'ensemble est utilisé comme mesure de dispersion. Les coordonnées sont affichées en WGS84 sans projection.

4.3 Pb-Zn de type PC

La carte de prospectivité pour le Pb-Zn de type PC a été créée à partir d'un total de 2 000 modèles. Aucun modèle n'a été rejeté en raison d'un sur-ajustement excessif. Le score AUC-ROC des modèles de l'ensemble est généralement supérieur au score F1 (Fig. 12a). Le couplage entre le domaine spatial et le domaine des variables est bruité, bien que statistiquement, les scores plus élevés des modèles dans le domaine des variables soient corrélés à une meilleure performance spatiale (Fig. 12b). En comparaison avec le modèle initial, la carte de prospectivité montre qu'une zone substantielle de cibles de type greenfield est devenue disponible (Figs. 13, 14). Cette augmentation est favorable à l'exploration canadienne pour le Pb-Zn de type PC, car le modèle initial n'avait pas révélé un potentiel élevé de minéralisation au Canada. La comparaison est également valable pour l'Australie (Figs. 15, 16). Les cartes d'incertitude (Figs. 17, 18) sont des cartes complémentaires aux cartes de prospectivité (Figs. 14, 16, respectivement). Elles représentent le degré de désaccord entre tous les modèles.

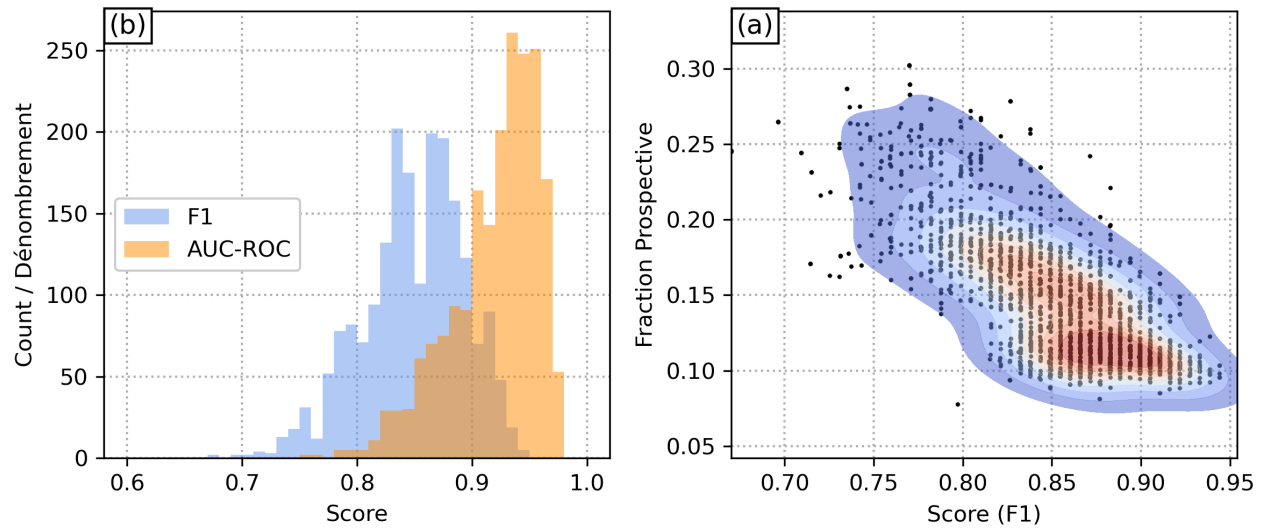


FIGURE 12. Performances variables et spatiales de l'ensemble profond pour le Pb-Zn de type PC. Les performances de l'ensemble sont présentées sous forme d'histogramme (a) et de dispersion (b).

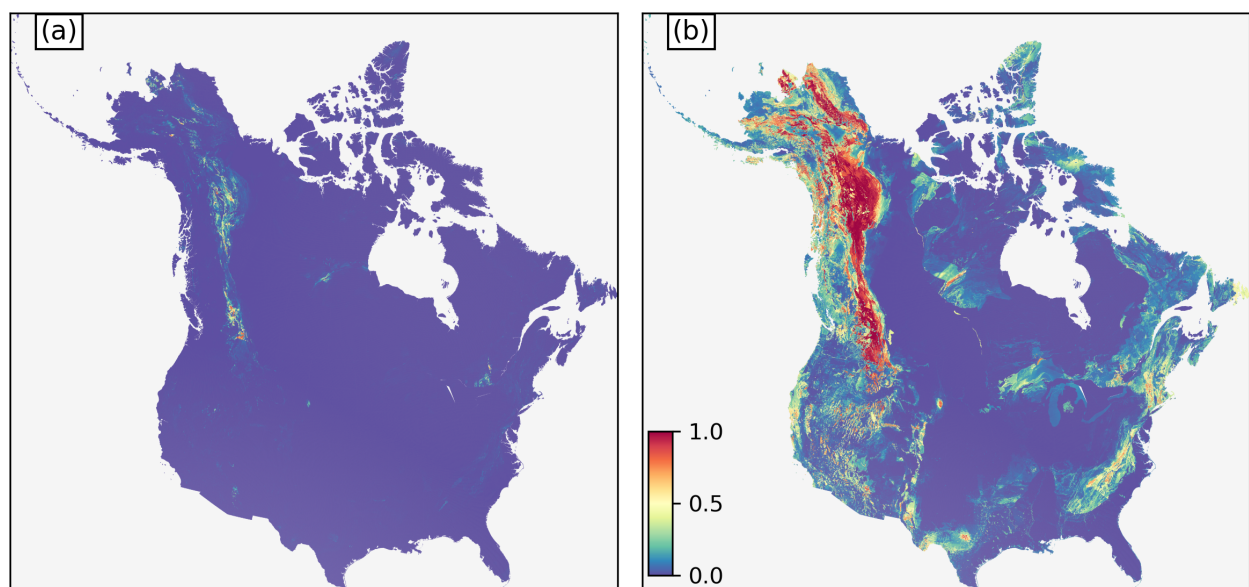


FIGURE 13. Comparaison des informations de ciblage originales fournies par un modèle unique (a) et un ensemble approfondi de modèles (b) pour le système minéralisé Pb-Zn de type PC en Amérique du Nord. La projection utilisée est celle du système Lambert de l'Atlas canadien.

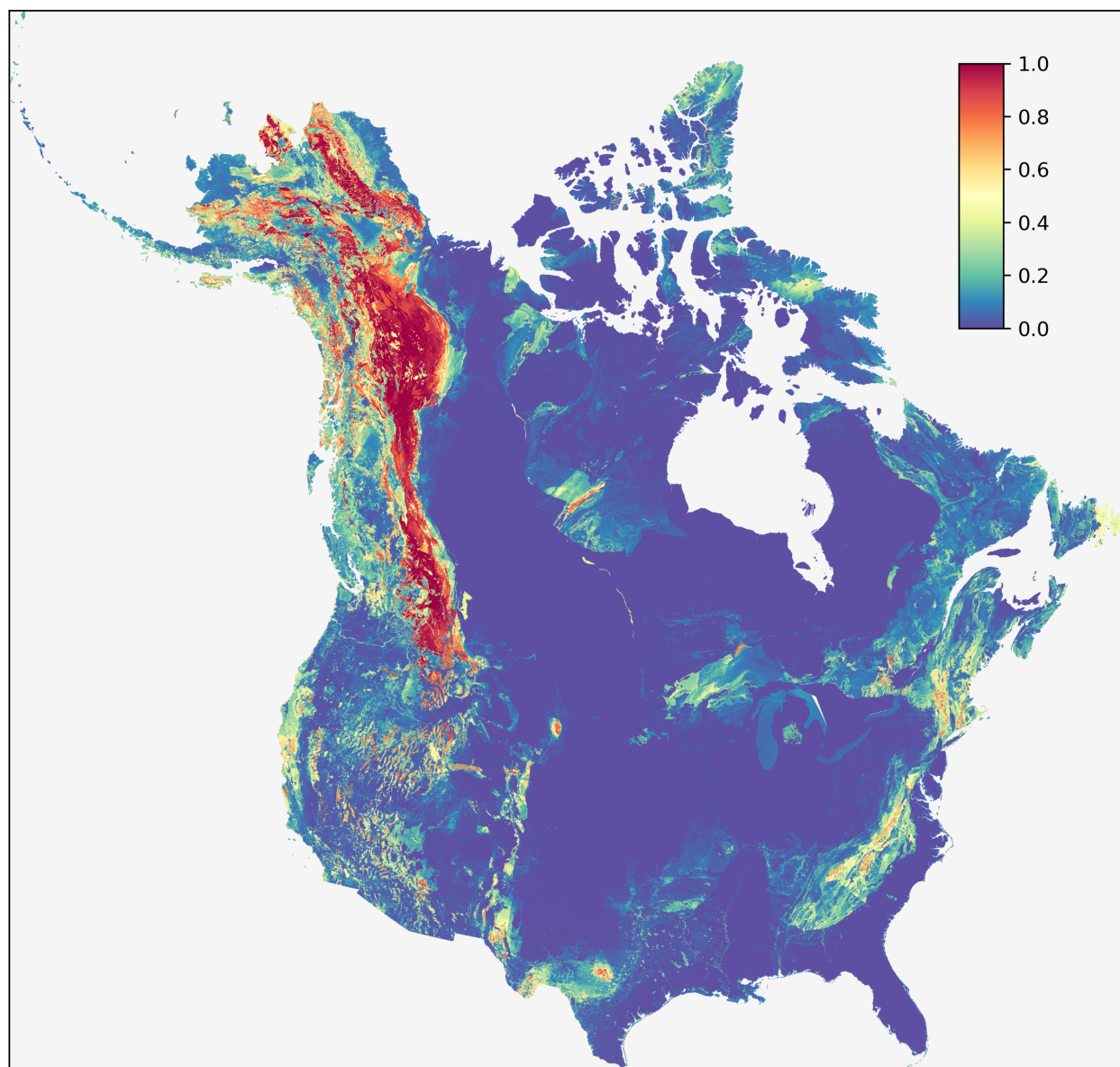


FIGURE 14. Carte de prospectivité à haute résolution du système minéralisé Pb-Zn de type PC. La projection utilisée est celle du système Lambert de l'Atlas canadien.

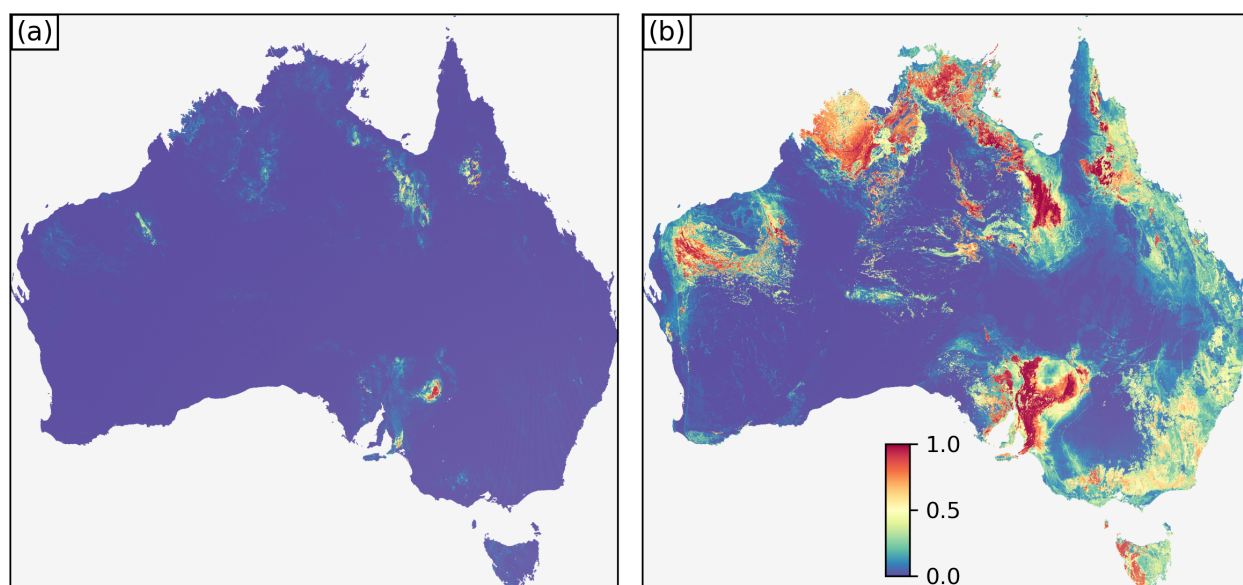


FIGURE 15. Comparaison des informations de ciblage originales fournies par un modèle unique (a) et le modèle étendu (b) pour le système minéralisé Pb-Zn de type PC en Australie. Les coordonnées sont affichées en WGS84 sans projection.

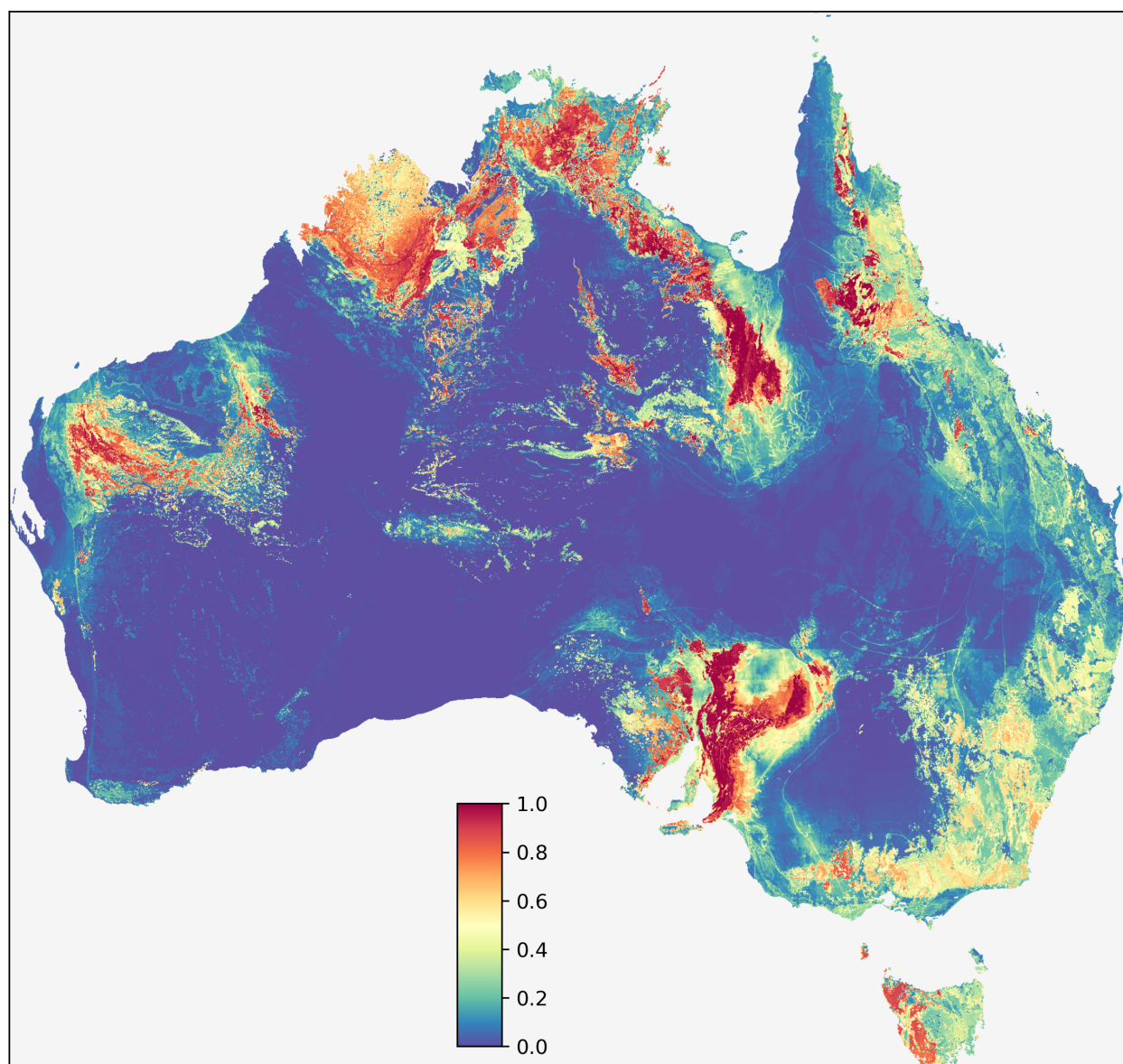


FIGURE 16. Version haute résolution de la carte de prospectivité du Pb-Zn de type PC en Australie. Les coordonnées sont affichées en WGS84 sans projection.

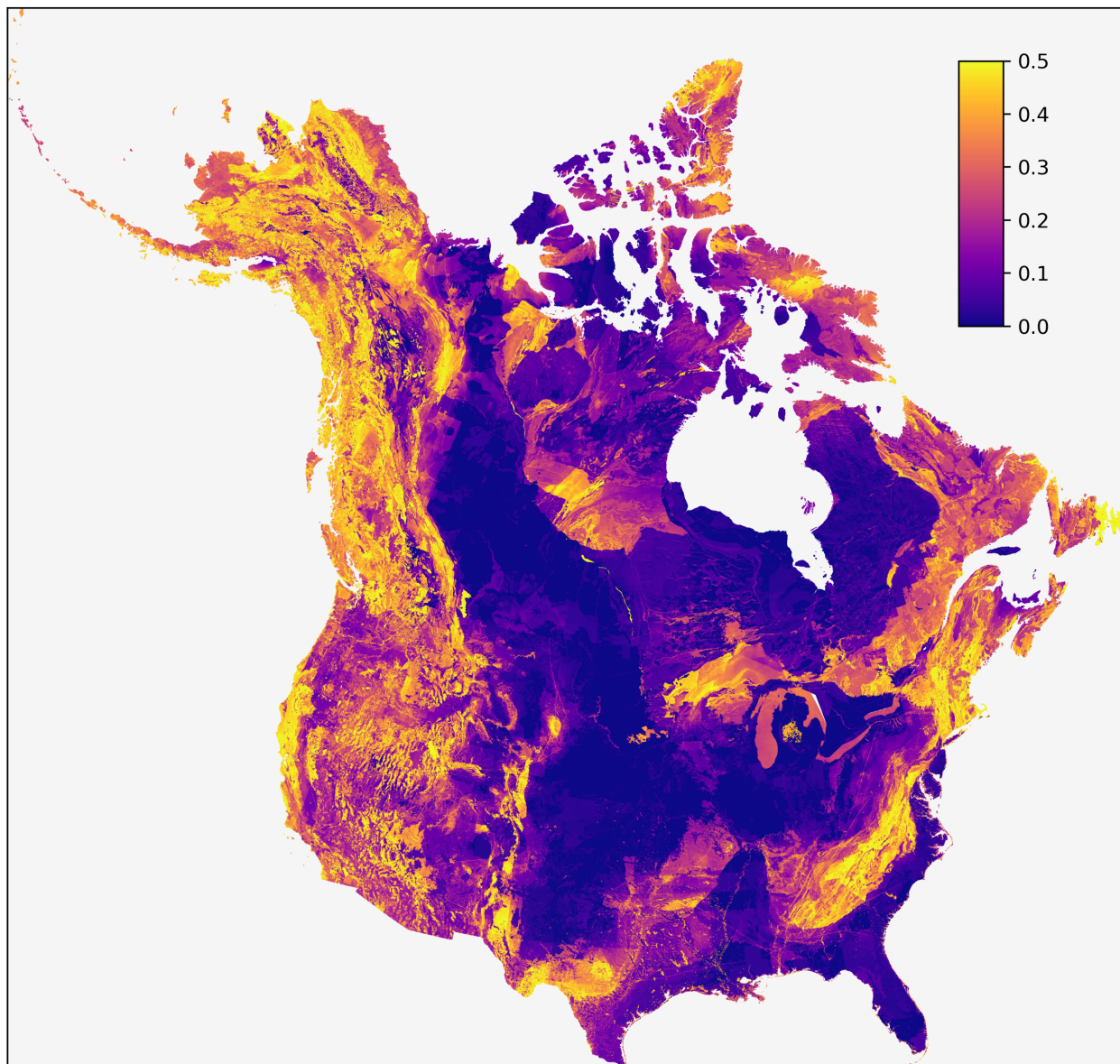


FIGURE 17. Incertitude des données de ciblage pour le système minéralisé Pb-Zn de type PC en Amérique du Nord. L'écart type de l'ensemble est utilisé comme mesure de dispersion. La projection utilisée est celle du système Lambert de l'Atlas canadien.

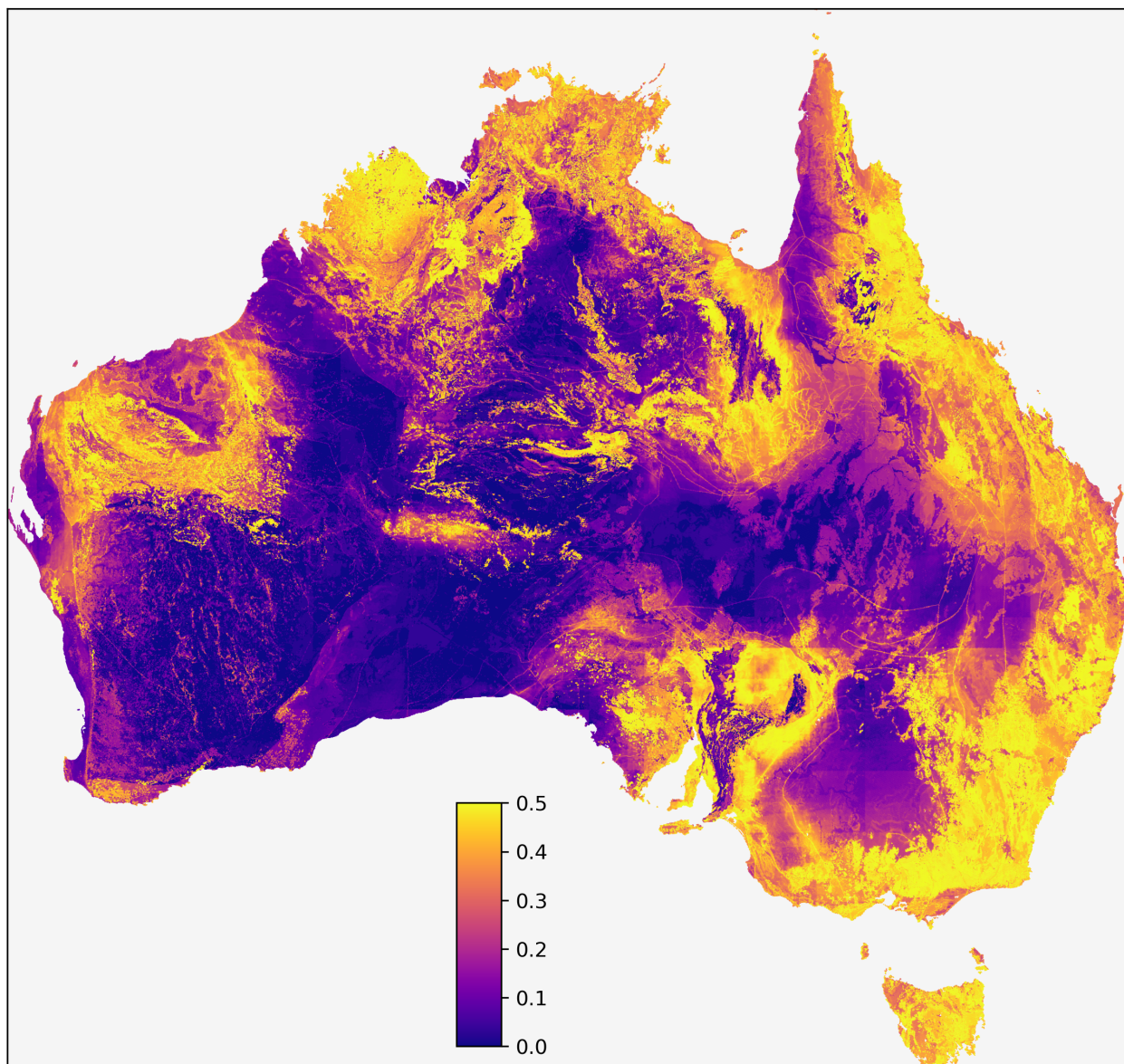


FIGURE 18. Incertitude des informations de ciblage pour le système minéral Pb-Zn de type PC en Australie. L'écart type de l'ensemble est utilisé comme mesure de dispersion. Les coordonnées sont affichées en WGS84 sans projection.

5 Conclusion

Ce rapport présente des modèles de prospectivité élargis pour plusieurs minéraux critiques au Canada. Ces modèles sont à la fois utiles pour l'exploration minérale au travers du Canada, menée de manière rapide et agile, et destinés à des fins scientifiques de référence. Des modèles améliorés pourraient s'appuyer sur les modèles présentés ici pour des comparaisons statistiquement robustes. Les modèles élargis ont été produits à l'aide d'une méthode d'ensemble approfondie qui a propagé l'incertitude parvenue d'entre les praticiens ou induite par le flux de travail.

Remerciements

Nous tenons à remercier Christopher J.M. Lawley, dont l'inspiration, les commentaires et les encouragements ont permis la réalisation de ce rapport. Nous remercions également Renato Cumani pour ses commentaires critiques qui ont permis d'améliorer ce rapport.

Références

- Bourdeau, J.E. and Lawley, C.J.M., 2025. Datasets to support prospectivity modelling for graphite deposits and occurrences in Canada; Geological Survey of Canada, Open File 9236, 6 p. [doi:https://doi.org/10.4095/prabb6xmef](https://doi.org/10.4095/prabb6xmef).
- Gneiting, T. and Raftery, A.E., 2005. Weather forecasting with ensemble methods; *Science*, v. 310, no. 5746, p. 248–249. [doi:10.1126/science.1115255](https://doi.org/10.1126/science.1115255).
- Hoffmann, J., Zortea, M., de Carvalho, B. and Zadrozny, B., 2021. Geostatistical learning : Challenges and opportunities; *Frontiers in Applied Mathematics and Statistics*, v. 7, p. 689393. [doi:https://doi.org/10.3389/fams.2021.689393](https://doi.org/10.3389/fams.2021.689393).
- Krishnamuri, T.N., Kishtawal, C.M., Zhang, Z., LaRow, T., Bachiochi, D., Williford, E., Gadgil, S. and Suren-dran, S., 2000. Multimodel ensemble forecasts for weather and seasonal climate; *Journal of Climate*, v. 13, no. 23, p. 4196–4216. [doi:10.1175/1520-0442\(2000\)013<4196:MEFFWA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<4196:MEFFWA>2.0.CO;2).
- Lawley, C.J.M., McCafferty, A.E., Graham, G.E., Huston, D.L., Kelley, K.D., Czarnota, K., Paradis, S., Peter, J.M., Hayward, N., Barlow, M., Emsbo, P., Cohan, J., San Juan, C. and Gadd, M.G., 2022. Data driven prospectivity modelling of sediment hosted Zn-Pb mineral systems and their critical raw materials; *Ore Geology Reviews*, v. 141, p. 104635. [doi:10.1016/j.oregeorev.2021.104635](https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104635).
- Lawley, C.J.M., Tschirhart, V., Smith, J.W., Pehrsson, S.J., Schetselaar, E.M., Schaeffer, A.J., Houlié, M.G. and Eglington, B.M., 2021. Prospectivity modelling of Canadian magmatic Ni ($\pm$ Cu $\pm$ Co $\pm$ PGE) sulphide mineral systems; *Ore Geology Reviews*, v. 132, p. 103985. [doi:10.1016/j.oregeorev.2021.103985](https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.103985).
- Maqsood, I., Khan, M.R. and Abraham, A., 2004. An ensemble of neural networks for weather forecasting; *Neural Computing & Applications*, v. 13, no. 2, p. 112–122. [doi:10.1007/s00521-004-0413-4](https://doi.org/10.1007/s00521-004-0413-4).
- Nwaila, G.T., Zhang, S.E., Bourdeau, J.E., Carranza, E.J.M., Enslin, S., Manzi, M.S.D., Andriampemanana, F. and Ghorbani, Y., 2024. Mineral reconnaissance through scientific consensus : First national prospectivity maps for PGE-Ni-Cu-Cr and Witwatersrand-type Au deposits in South Africa; *Natural Resources Research*, v. 33, p. 2357–2384. [doi:https://doi.org/10.1007/s11053-024-10390-w](https://doi.org/10.1007/s11053-024-10390-w).
- Uber Technologies Inc., 2020. H3 : A hexagonal hierarchical geospatial indexing system; GitHub Repository. <https://github.com/uber/h3>.
- Zhang, S.E., Coutts, D., Parsa, M., Cumani, R. and Thompson, A., 2025a. Recursive annotation for negative labelling in data-driven mineral prospectivity mapping; *Natural Resources Research*, v. 34, p. in press. [doi:https://doi.org/10.1007/s11053-025-10510-0](https://doi.org/10.1007/s11053-025-10510-0).
- Zhang, S.E., Lawley, C.J.M., Bourdeau, J.E., Nwaila, G.T. and Ghorbani, Y., 2024. Workflow-induced uncertainty in data-driven mineral prospectivity mapping; *Natural Resources Research*, v. 33, p. 995–1023. [doi:https://doi.org/10.1007/s11053-024-10322-8](https://doi.org/10.1007/s11053-024-10322-8).
- Zhang, S.E., Lawley, C.M.J., Bourdeau, J.E., Parsa, M., Cumani, R. and Thompson, A., 2025b. Mineral prospectivity modeling of graphite deposits and occurrences in Canada; *Natural Resources Research*, v. 34, p. 1243–1270. [doi:https://doi.org/10.1007/s11053-024-10451-0](https://doi.org/10.1007/s11053-024-10451-0).
- Zuo, R., 2016. A nonlinear controlling function of geological features on magmatic–hydrothermal mineralization; *Scientific Reports*, v. 6, no. 1, p. 27127. [doi:https://doi.org/10.1038/srep27127](https://doi.org/10.1038/srep27127).