

Représentation de l'incertitude des cartes de qualité des sols :

Préférences des utilisateurs et impacts sur leurs décisions d'aménagement du territoire

L. Courteille^(1, 2*), L. Tardieu^(3, 4), N. Boukhelifa^(5, 6), E. Lutton^(5, 6) et P. Lagacherie⁽¹⁾

1) LISAH, INRAE, Institut Agro Montpellier, IRD, Univ Montpellier, Montpellier, France

2) INRAE, Info&Sols, Orléans, France

3) TETIS, INRAE, AgroParisTech, CIRAD, CNRS, Univ Montpellier, Montpellier, France

4) CIRED, École des Ponts ParisTech, AgroParisTech, université Paris-Saclay, Cirad, CNRS, EHESS, Nogent-sur-Marne, France

5) MIA-PS, INRAE, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 22 place de l'Agronomie, Palaiseau, France

6) UAR 3611 Institut des Systèmes Complexes Paris Ile-de-France, CNRS, 113 rue Nationale, Paris, 75013, France

* Auteur correspondant : lea.courteille@inrae.fr

Cet article est une synthèse en français de deux articles publiés chez Elsevier sous la licence CC BY (Creative Commons Attribution License) : Courteille et al., 2025 ; 2026.

RÉSUMÉ

La prise en compte de la qualité des sols dans les décisions d'aménagement présente un fort potentiel pour limiter l'artificialisation : dans cette perspective, des cartes de qualité des sols sont de plus en plus demandées par les acteurs du territoire. Les produire à l'aide de la Cartographie des Sols par Modélisation Statistique (CSMS), permet, entre autres avantages, de quantifier leurs incertitudes, dans le but de renseigner l'utilisateur sur la fiabilité des données. Cependant, les utilisateurs peinent généralement à interpréter ces incertitudes, et faute de pouvoir aisément les intégrer dans leur prise de décision, tendent à les ignorer. Il est ainsi nécessaire d'améliorer la représentation de ces incertitudes pour faciliter leur intégration dans les processus décisionnels. D'après la littérature, deux principaux leviers peuvent être mobilisés pour mieux les représenter : la visualisation de l'information sol et de son incertitude sur la même carte, et l'agrégation spatiale de l'information. Dans cette étude, nous avons conduit une enquête en ligne auprès d'utilisateurs finaux de cartes de qualité des sols, pour jauger le potentiel de ces leviers de deux manières complémentaires : en évaluant (1) les effets de diverses représentations cartographiques sur la prise de décision et (2) les préférences des utilisateurs vis à vis de ces représentations. Nos résultats nous ont permis d'identifier

Comment citer cet article :

Courteille L., Tardieu L., Boukhelifa N., Lutton E. et Lagacherie P., 2026 - Représentation de l'incertitude des cartes de qualité des sols : préférences des utilisateurs et impacts sur leurs décisions d'aménagement du territoire, *Étude et Gestion des Sols*, 33, 201-215

les facteurs guidant la prise de décision des utilisateurs, et montrent que les impacts de ces facteurs diffèrent nettement suivant la décision considérée (artificialisation versus sanctuarisation d'une parcelle). Nos résultats ont également montré que globalement, les utilisateurs préfèrent les cartes modérément agrégées mais ne sont pas en faveur d'une représentation de l'information sol et de son incertitude sur la même carte. Enfin, les données recueillies lors de cette enquête ont permis d'évaluer l'impact des caractéristiques socio-démographiques et de l'expérience des utilisateurs sur leurs préférences et leur comportement décisionnel. Cette étude est la première à faire un lien quantitatif entre niveau d'agrégation, niveau d'incertitude et comportement décisionnel. Les résultats de cette enquête nous ont ainsi permis de formuler des recommandations claires, à l'attention des producteurs de cartes de sols mais aussi d'autres variables environnementales (liées aux services écosystémiques, à la biodiversité, etc), afin de les rendre plus aptes à éclairer les décisions d'aménagement.

Mots-clés

Incertitude, agrégation spatiale, représentation cartographique, CSMS, qualité des sols, utilisateurs

SUMMARY

REPRESENTING THE UNCERTAINTY OF SOIL QUALITY MAPS: User preferences and impacts on their land-planning decisions

The integration of soil quality into land-use planning decisions is increasingly recognized as a promising approach to limiting land take. Consequently, there is growing demand for soil quality maps among stakeholders. Producing these maps through Digital Soil Mapping (DSM) offers several advantages, including the ability to quantify prediction uncertainty, thereby providing users with information about the reliability of the data. However, end users generally struggle to interpret uncertainty information and, because they cannot easily incorporate it into their decision-making processes, they often disregard it. Improving the representation of uncertainty is therefore essential to facilitate its integration into planning decisions. According to the literature, two main approaches can enhance uncertainty communication: displaying soil information and its associated uncertainty on the same map, and spatial aggregation. In this study, we conducted an online survey of end users of soil quality maps to assess the potential of these approaches in two complementary ways: (1) by examining the effects of different uncertainty representations on decision-making and (2) by evaluating users' preferences regarding these representations. The survey enabled us to identify the factors driving their decisions and revealed that the influence of these factors differs markedly depending on the type of decision considered (soil sealing versus soil conservation). Our results also showed that users generally prefer moderately aggregated maps but do not favor displaying soil information and its associated uncertainty on the same map. Finally, the data collected allowed us to assess the influence of respondents' socio-demographic characteristics and professional experience on both their preferences and their decision-making behavior. To our knowledge, this is the first study to quantitatively establish a link between uncertainty and aggregation levels and decision-making behavior. Based on our findings, we propose clear recommendations for producers of soil maps, as well as maps of other environmental variables (e.g., ecosystem services and biodiversity), to improve their usefulness in supporting land-use planning decisions.

Key-words

Uncertainty, spatial aggregation, map representation, DSM, soil quality, end users

RESUMEN

CÓMO COMUNICAR LA INCERTIDUMBRE DE LOS MAPAS DE CALIDAD DEL SUELO: Preferencias de los usuarios e impactos en sus decisiones de ordenación territorial

La consideración de la calidad de los suelos en las decisiones de ordenación presenta un gran potencial para limitar la artificialización: en esta perspectiva, los actores del territorio exigen cada vez más mapas de calidad del suelo. Producirlos utilizando la Cartografía de Suelos por Modelización Estadística (CSMS), permite, entre otras ventajas, cuantificar sus incertidumbres, con el fin de informar al usuario sobre la fiabilidad de los datos. Sin embargo, los usuarios suelen tener dificultades para interpretar estas incertidumbres y, al no poder integrarlas fácilmente en su toma de decisiones, tienden a ignorarlas. Por lo tanto, es necesario mejorar la representación de estas incertidumbres para facilitar su integración en los procesos de toma de decisiones. Según la literatura, se pueden movilizar dos palancas principales para representarlos mejor: la visualización de la información del suelo y su incertidumbre en el mismo mapa, y la agregación espacial de la información. En este estudio, realizamos una encuesta en línea entre los usuarios finales de mapas de calidad del suelo para medir el potencial de estas palancas de dos maneras complementarias: (1) evaluando los efectos de diversas representaciones cartográficas sobre la toma de decisiones y (2) las preferencias de los usuarios con respecto a estas representaciones. Nuestros resultados nos permitieron identificar los factores que guían la toma de decisión de los usuarios, y muestran que los impactos de estos factores difieren marcadamente según la

decisión considerada (artificialización versus santuarización de una parcela). Nuestros resultados también mostraron que, en general, los usuarios prefieren mapas moderadamente agregados pero no están a favor de una representación de la información suelo y de su incertidumbre en el mismo mapa. Por último, los datos recopilados en esta encuesta permitieron evaluar el impacto de las características sociodemográficas y de la experiencia de los usuarios sobre sus preferencias y su comportamiento de toma de decisiones. Este estudio es el primero en hacer un vínculo cuantitativo entre nivel de agregación, nivel de incertidumbre y comportamiento de decisión. Los resultados de esta encuesta nos permitieron formular recomendaciones claras, dirigidas a los productores de mapas de suelos, pero también a otras variables ambientales (relacionadas con los servicios ecosistémicos, la biodiversidad, etc.), a fin de hacerlos más idóneos para orientar las decisiones de ordenación.

Palabras clave

Incetidumbre, agregación espacial, representación cartográfica, CSMS, calidad del suelo, usuarios

1. INTRODUCTION

Les cartes de qualité des sols sont de plus en plus demandées pour appuyer les décisions d'aménagement du territoire. Contrairement aux cartes pédologiques traditionnelles qui représentent l'information sol sous forme de classes de sol (comme les Référentiels Régionaux Pédologiques par exemple) ou aux cartes de propriétés de sol, les cartes de qualité des sols représentent l'information sol sous l'angle de fonctions d'intérêt (écologiques, hydriques ou climatiques) que le sol est en capacité de remplir (Maring *et al.*, 2019 ; Karlen *et al.*, 1997). Elles sont donc plus directement interprétables par les décideurs, rarement familiers de la pédologie. Elles mettent en lumière les sols remplissant de nombreux services écosystémiques et les terres agricoles de qualité, contribuant ainsi à leur considération dans les décisions d'aménagement, et à leur préservation (Grêt-Regamey *et al.*, 2014 ; Montanarella, 2017 ; Greiner *et al.*, 2018 ; Rabot *et al.*, 2022).

La production des cartes de qualité des sols s'appuie de plus en plus sur la Cartographie des Sols par Modélisation Statistique (CSMS, ou *Digital Soil Mapping* (DSM) en anglais). En CSMS, la zone cartographiée est représentée par une grille de pixels (ou carte raster) d'une résolution spatiale donnée (par exemple, 25 m x 25 m), contrairement aux cartes pédologiques traditionnelles, où la zone cartographiée est divisée en polygones représentant des unités cartographiques de sol (UCS), ou pédopaysages. En cartographie traditionnelle, ces unités sont délimitées et décrites par des experts pédologues ; en CSMS, ce sont des modèles statistiques qui prédisent la valeur de chaque pixel. Un apport majeur de la CSMS est qu'elle permet la quantification de l'incertitude cartographique (Heuvelink, 2014 ; Arrouays *et al.*, 2014). Cela a permis d'identifier le fait que les cartes de qualité des sols présentent une incertitude importante, découlant à la fois des erreurs de spatialisation et de la procédure d'évaluation de la qualité (Courteille, 2025). Une quantification précise, assortie d'une représentation intelligible de cette incertitude est indispensable pour permettre aux utilisateurs de déterminer si la carte est à même d'appuyer leurs décisions (Dovers *et al.*,

2017 ; Brown, 2004 ; Jansen *et al.*, 2022). Pour l'instant, notre expérience montre que les utilisateurs ont généralement des difficultés à considérer cette incertitude dans leur prise de décision. Ils ont en effet tendance à adopter deux comportements opposés : soit les valeurs élevées d'incertitude les poussent à remettre en question la fiabilité de la donnée dans son entièreté, soit, faute de savoir comment les prendre en compte, ils décident de les ignorer, traitant de fait la donnée sol comme si elle était parfaitement fiable.

Dans la littérature en CSMS, deux leviers ont été identifiés pour mieux communiquer l'incertitude aux utilisateurs des cartes et éviter ces deux comportements, ainsi que les prises de risques qu'ils engendrent. Le premier relève des représentations combinées de l'information sol et de son incertitude, ce qui limite le risque d'ignorer cette dernière (Loiseau *et al.*, 2020). Le deuxième est l'agrégation spatiale, qui consiste à représenter l'information spatiale à une résolution plus grossière pour réduire son incertitude (Vaysse *et al.*, 2017 ; Padarian et McBratney, 2023 ; Courteille *et al.*, 2024). En jouant sur ces deux leviers, peuvent émerger toute une série de représentations alternatives de la même information spatiale.

Dans cette étude, nous avons entrepris de jauger le potentiel de ces représentations alternatives de deux manières complémentaires : d'une part en regardant si ces représentations influencent ou biaisent la prise de décision, d'autre part en évaluant les préférences des utilisateurs finaux des cartes vis-à-vis de ces représentations. Par utilisateurs finaux, nous entendons ici tout utilisateur potentiel de cartes de qualité des sols pour la prise de décision (aménageurs, gestionnaires de projets, consultants). Pour apporter des réponses à ces deux questions de recherche, nous avons conçu une enquête en ligne ayant recueilli 263 réponses. Ce papier présente une synthèse des résultats de cette enquête, initialement publiés dans Courteille *et al.* (2025) et Courteille *et al.* (2026). Leur discussion nous a permis de faire émerger des recommandations pour produire des cartes de qualité des sols plus opérationnelles.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 Production de cartes de qualité des sols

La zone d'étude que nous avons choisie pour conduire cette étude est située en région Occitanie. La croissance démographique au niveau de sa plaine côtière est forte depuis des décennies (croissance moyenne de 1,4 % entre 1999 et 2006). Cette croissance a conduit à un étalement urbain rapide et incontrôlé, aux dépens des terres agricoles (200 km² urbanisés entre 1997 et 2009) (Balestrat *et al.*, 2011), ce qui a entraîné une destruction irréversible de sols de haute qualité (Angelini *et al.*, 2023). Cela a motivé les travaux de Rabot *et al.* (2022), qui ont défini un indicateur de qualité des sols pertinent et calculable à l'échelle de l'Occitanie, afin d'appuyer les décisions d'aménagement territorial. Cet indice de qualité, nommé Agri-SPMI, évalue la multifonctionnalité potentielle d'un sol en évaluant sa capacité à remplir les quatre fonctions suivantes, dans cinq scénarios d'usage : (i) fourniture d'un habitat physique pour la production de biomasse, (ii) fourniture d'un habitat chimique pour la production de biomasse, (iii) rétention et transfert de l'eau et des polluants et (iv) stockage du carbone. La capacité d'un sol à remplir chacune de ces fonctions a été estimée dans cinq scénarios d'usage des sols plus ou moins contraignants (cultures annuelles, cultures pérennes, prairies, forêt et friches), en appliquant à 14 propriétés de sol des valeurs seuils définies par des experts. En additionnant le nombre de fonctions remplies par un sol dans chaque scénario, on obtient un score qui va de 0 à $4 \times 5 = 20$.

Angelini *et al.* (2023) ont intégré cette méthode d'évaluation de la qualité des sols à une procédure de CSMS, afin de produire une carte d'Agri-SPMI à résolution 25 mètres (chaque pixel couvre un carré de 25 m de côté) couvrant la plaine côtière de l'Occitanie, accompagnée d'une carte d'incertitude.

2.2 Représentation cartographique de l'incertitude

Deux méthodes d'agrégation de l'information sol avaient été auparavant introduites dans la communauté CSMS, par Vaysse *et al.* (2017) et Padarian et McBratney (2023). Dans Courteille *et al.* (2024), nous avons proposé une méthode d'agrégation alternative, qui repose sur l'algorithme de Clustering Agglomératif (CA) (Ward, 1963) pour générer des cartes plus ou moins détaillées à partir d'une carte raster. Cet algorithme présente l'avantage de produire des zones agrégées (ou polygones) les plus homogènes possible.

Cette baisse du niveau de détail de la carte induit naturellement une baisse de la quantité d'informations délivrées par la carte, qui n'est pas forcément souhaitée par l'utilisateur. Cet effet s'accompagne en revanche d'une diminution de

l'incertitude des valeurs affichées, intéressante pour l'utilisateur car elle facilite la prise en compte de l'incertitude. L'agrégation spatiale introduit ainsi un compromis entre perte d'informations spatiales et abaissement de l'incertitude, le long duquel le degré d'agrégation optimal reste à déterminer. Dans Courteille *et al.* (2024), nous avons comparé trois méthodes d'agrégation (méthodes Vaysse *et al.* (2017), Padarian et McBratney (2023) et CA) et montré que la méthode CA permettait de limiter la perte d'information spatiale induite par l'agrégation, tout en diminuant l'incertitude tout aussi efficacement que les deux autres. Cette méthode permet donc d'atteindre des représentations avec un niveau d'incertitude faible mais dont le niveau d'information reste élevé, qui sont théoriquement avantageuses le long du compromis. Notre hypothèse était néanmoins que les préférences des utilisateurs ne porteraient pas nécessairement vers ces représentations, car celles-ci sont influencées par leurs besoins, et notamment leur échelle de prise de décision et leur tolérance face à l'incertitude. C'est pourquoi dans le cadre de l'enquête, nous leur avons présenté des cartes avec 4 niveaux d'agrégation différents pour explorer les préférences des utilisateurs vis-à-vis du compromis résolution-incertitude.

2.3 Conception et diffusion de l'enquête

Pour soumettre ces représentations cartographiques aux utilisateurs, nous avons conçu une enquête en ligne à l'aide de LimeSurvey¹, structurée en quatre grandes parties. La première partie recueillait des informations sur les répondants, en lien avec leurs caractéristiques socio-démographiques, leur métier et leur expérience en matière d'utilisation ou de production de cartes de sols. Ces questions nous ont notamment permis d'obtenir des statistiques descriptives de la population enquêtée, afin d'évaluer sa représentativité par rapport aux populations d'utilisateurs connues.

La deuxième partie du questionnaire consistait en un tutoriel. Elle commençait par la présentation de quatre cartes différentes, affichant des niveaux de difficulté et des quantités d'informations variables. Il était demandé aux répondants d'extraire des valeurs de qualité des sols et d'incertitude affichées sur les cartes. Ces quatre questions nous ont permis de familiariser les répondants à la lecture des cartes et d'identifier a posteriori ceux qui rencontraient des difficultés dans cette tâche. Le tutoriel se terminait par deux exemples dans lesquels les utilisateurs devaient prendre une décision pour une parcelle détournée, en suivant une règle de décision donnée. Ces deux questions étaient suivies de corrections. Elles nous ont permis d'identifier a posteriori les utilisateurs ayant des difficultés à comprendre cet exercice de prise de décision.

1 LimeSurvey GmbH. Limesurvey. URL <https://www.limesurvey.org/>.

Dans la troisième partie, les répondants devaient prendre une décision concernant une parcelle donnée, à partir de différentes représentations cartographiques des données de qualité des sols. Deux variantes du questionnaire ont été conçues (Figure 1). Dans la première, il était demandé aux répondants d'indiquer si les parcelles délimitées devaient être artificialisées, d'après la consigne suivante : « Artificialisez les parcelles avec des sols de moindre qualité (indice de qualité des sols (IQS) inférieur ou égal à 17) ou situées au sein d'une zone dont la proportion de sols de haute qualité est inférieure ou égale à 40 % ». Dans l'autre variante, les répondants devaient décider si les parcelles devaient être sanctuarisées, d'après la consigne suivante : « Sanctuarisez les parcelles avec des sols de haute qualité (un indice de qualité des sols (IQS) supérieur ou égal à 18) ou situées au sein d'une zone dont la proportion de sols de haute qualité est supérieure ou égale à 60 % ». Les participants ont été répartis aléatoirement entre ces deux variantes puis ont pris dix décisions d'aménagement du territoire. En plus de permettre d'identifier les facteurs impactant leurs décisions, cette partie du questionnaire permettait également aux répondants d'acquérir une certaine expérience de prise de décision sous incertitude avant de recueillir leurs préférences. Dans la suite du document, cette partie de l'enquête sera appelée « phase décision ».

La quatrième partie du questionnaire, visant à sonder les préférences des répondants, consistait en une série de dix choix entre deux représentations cartographiques différentes d'un même contexte spatial. Dans la suite du document, cette partie de l'enquête sera appelée « phase préférences ».

À la toute fin du questionnaire, les répondants étaient libres de laisser des commentaires en réponse à la question suivante : « Avez-vous des remarques concernant cette étude ? ». L'analyse thématique de ces commentaires (Clarke et Braun, 2017) nous a permis d'enrichir la discussion des résultats.

Le questionnaire a été diffusé entre mars et juillet 2024. Nous l'avons transmis à de nombreux réseaux professionnels via des listes de diffusion, en publiant des messages sur les forums concernés, et en le présentant lors d'ateliers et de conférences pertinents. Une liste de tous les réseaux et organisations contactés figure en annexe (Tableau 2). Cette stratégie de diffusion a été conçue afin de couvrir l'ensemble des publics concernés par nos questions de recherche : géomaticiens, urbanistes, consultants et chercheurs.

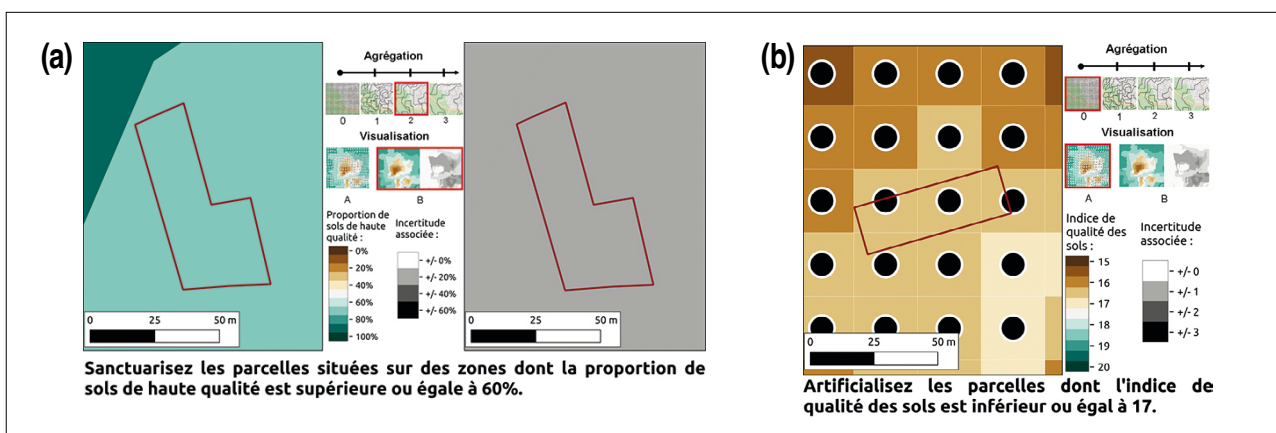
2.4 Choix des représentations

En plus de la visualisation de l'incertitude via une carte séparée, nous avons choisi de proposer une visualisation conjointe (sur la même carte) de l'incertitude et de l'information sol. Cette visualisation devait être aussi proche que possible de la visualisation en cartes séparées. C'est pourquoi nous avons retenu l'utilisation d'un motif de points dont le niveau de gris indique la marge d'incertitude (Figure 1).

Les représentations soumises aux répondants ont été adaptées aux questions de recherche et varient entre la phase « décision » et la phase « préférences ». En phase « décision », les cartes sont centrées sur une parcelle détournée (Figure 1) tandis qu'en phase « préférences », les cartes ont

Figure 1 : Exemple de deux cartes soumises aux répondants en phase 3, avec les deux types de visualisation de l'incertitude : les « cartes séparées » (a) et la « carte à points » (b). Il convient de noter que sur les cartes agrégées, l'information sur la qualité des sols à l'échelle des polygones est représentée via une proportion de sols de haute qualité au sein de la zone (proportion de pixels de la zone ayant un Agri-SPMI supérieur à 18), plutôt que via l'Agri-SPMI moyen des pixels de la zone (Courteille et al., 2024).

Figure 1: Example of two maps submitted to respondents with the two types of uncertainty visualization: "separate maps" (a) versus "dot pattern" map (b). It is worth noting that, in aggregated maps, polygon-based soil quality is represented by the proportion of high-quality soils within each polygon (i.e., the proportion of pixels with an Agri-SPMI greater than 18), rather than by the mean SPMI value across the polygon (Courteille et al., 2024).



une emprise plus importante (1400 × 1800 mètres) pour simuler une prise de décision à l'échelle d'un territoire (Figure 2). Les méthodes employées pour s'assurer que les contextes spatiaux présentés en phase 3 et 4 (respectivement 36 et 15) aient des caractéristiques variées sont détaillées respectivement dans Courteille et al. (2026) et Courteille et al. (2025). Pour chacun des contextes spatiaux, 8 représentations alternatives (4 niveaux d'agrégation et 2 visualisations de l'incertitude) pouvaient être soumises aux répondants, résultant en respectivement 288 et 120 cartes testées.

2.5 Évaluation de l'impact des facteurs

Nous avons choisi d'utiliser un modèle à variable qualitative pour traiter les données relatives aux choix de décision. Parmi les modèles possibles, nous avons sélectionné la régression logistique multinomiale. Les signes des coefficients de la régression logit multinomiale indiquent si les variables influencent positivement ou négativement la probabilité de choisir de « sanctuariser/artificialiser ou pas » plutôt que de ne pas prendre de décision.

Les risques relatifs (RR) ont été calculés pour enrichir l'interprétation : dans le cadre de cette étude, ils quantifient à quel point une variable donnée modifie le rapport de la probabilité de la décision d'intérêt sur la probabilité de référence.

Un $RR > 1$ correspond à une augmentation de la probabilité prendre une décision d'intérêt (conserver/convertir ou pas), tandis qu'un $RR < 1$ correspond à une diminution de cette probabilité par rapport à l'état de référence : des RR de 1,5 et 0,75 correspondent ainsi respectivement à une augmentation de 50 %, et à une diminution de 25 % de cette probabilité.

Enfin, les prédictions marginales (*predictive margins*) viennent compléter l'analyse des résultats. Elles permettent de visualiser l'effet marginal d'une variation d'un facteur explicatif (niveau d'agrégation) sur les probabilités de chaque décision.

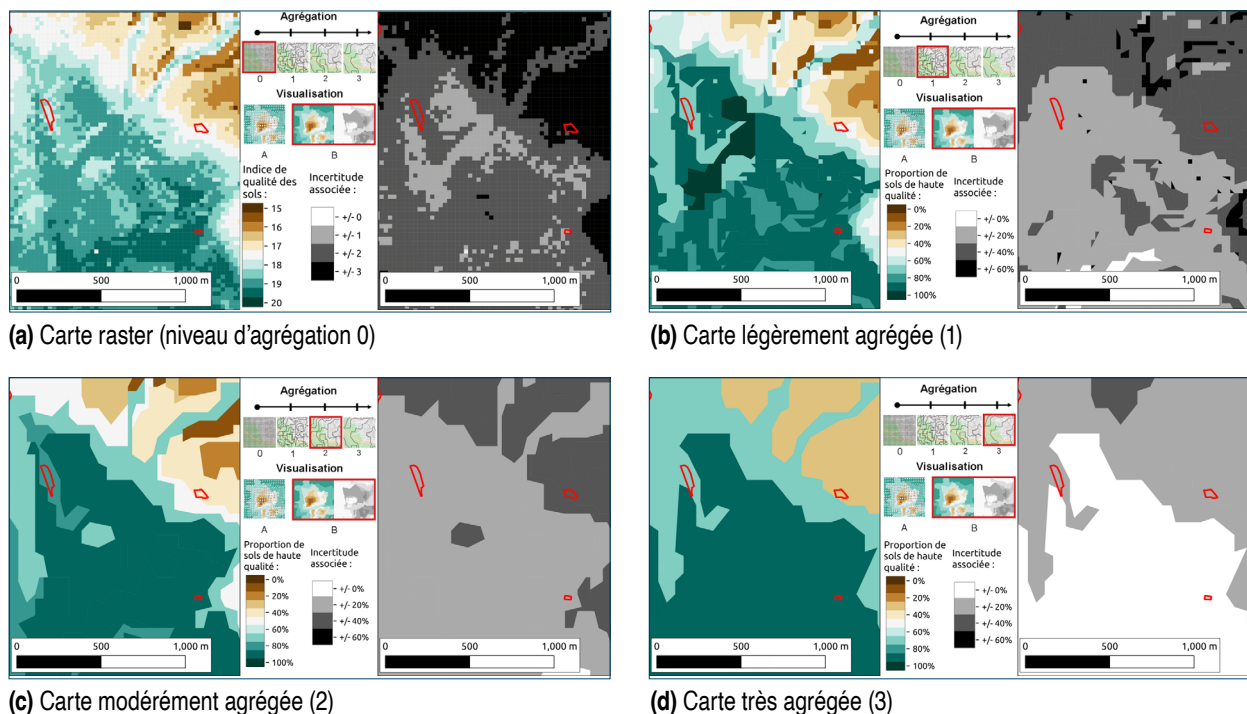
2.6 Évaluation des préférences

Une procédure de classement a été utilisée pour évaluer les préférences des répondants concernant la représentation de l'information sur la qualité des sols, dans un contexte de prise de décision.

Des représentations cartographiques concurrentes de la même information spatiale étaient présentées par paires. Il était demandé aux répondants de sélectionner la représentation qu'ils considéraient comme « la plus adaptée pour prendre des décisions d'aménagement du territoire dans le cadre de la directive [qu'ils] avaient précédemment appliquée », ou d'indiquer s'ils n'avaient pas de préférence.

Figure 2 : Quatre cartes représentant le même contexte spatial, à quatre résolutions spatiales différentes, où l'incertitude est visualisée via une carte séparée.

Figure 2: Maps representing the same spatial context at four different spatial resolutions, with uncertainty represented on a separate map.



Parmi les différentes méthodes disponibles pour classer des objets à partir de comparaisons par paires, nous avons suivi la recommandation de Goodspeed (2017) et choisi d'utiliser le système de notation Elo pour classer les cartes évaluées. Le score Elo est un système de notation initialement conçu par le physicien et joueur d'échecs Arpad Elo pour classer les joueurs d'échecs (Elo et Sloan, 1978 ;2008). L'algorithme Elo attribue un score unique à chaque carte en prenant en compte, de manière itérative, le résultat de chaque comparaison – assimilée ici à une rencontre entre deux joueurs –, dans laquelle la carte choisie est considérée comme gagnante. Les équations sur lesquelles ce système repose sont présentées dans Courteille *et al.* (2025). Plus une carte présente un score Elo élevé, plus cela signifie qu'elle a été préférée par les utilisateurs, face à des représentations concurrentes de la même information spatiale.

3. RÉSULTATS

3.1 Statistiques descriptives de l'échantillon de répondants

Sur les 1738 personnes ayant cliqué sur le lien de notre enquête, 280 personnes l'ont remplie entièrement. Néanmoins, afin de contrôler la qualité des réponses entrant dans notre analyse, nous avons décidé d'exclure les répondants ayant fait trop d'erreurs de lecture pendant le tutoriel, n'ayant pas compris l'exercice, ayant des temps de réponse anormalement courts, ou ayant toujours sélectionné la même option de réponse. Après avoir exclu 17 répondants sur la base de ces 4 critères, l'échantillon final contenait 263 répondants. Dans Courteille *et al.* (2025), nous avons comparé les caractéristiques de cet échantillon à ceux de la population ciblée, et avons montré sa représentativité. Parmi les 263 répondants, 144 sont des utilisateurs finaux travaillant dans différentes structures (Figure 3).

Une première analyse statistique des choix faits et des niveaux de compréhension de l'exercice rapportés par les utilisateurs montre que les répondants estimaient généralement avoir une très bonne compréhension de la tâche (4,28/5) et étaient globalement confiants dans leurs réponses (3,62/5). Les niveaux d'expertise concernant l'utilisation ou la production de cartes des sols sont légèrement supérieurs à la moyenne (respectivement 2,59 et 2,99), mais inférieurs à la moyenne pour l'utilisation et la production de cartes d'incertitude (respectivement 2,07 et 2,00).

3.2 Quantification de l'impact des représentations sur la prise de décision

Les résultats de la régression multinomiale sont présentés dans le *Tableau 1*. Nous avons distingué trois groupes de variables : celles qui n'ont pas d'effet significatif quelle que soit la décision considérée (Oui/Non) ou le scénario de décision (artificialisation/sanctuarisation), celles qui ont un effet ambigu (leur effet n'est significatif que pour une décision ou un scénario donnés), et celles dont l'effet est significatif dans tous les cas. Seules les variables appartenant à ces deux derniers groupes figurent dans le *Tableau 1*.

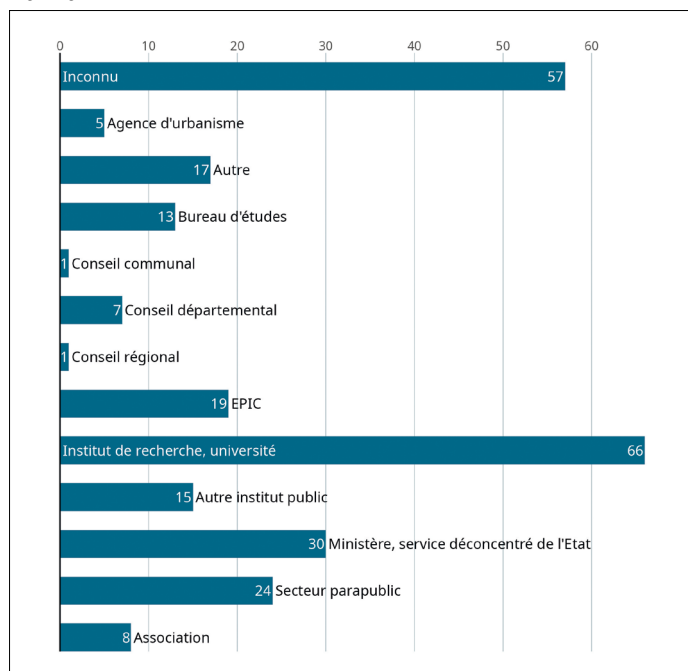
Les facteurs n'ayant eu aucun effet sont : la plupart des variables socio-démographiques (âge, catégorie socioprofessionnelle), le niveau d'expertise (utilisation et production de données d'incertitude), la compréhension et la facilité perçue de l'exercice, la prise en compte de l'incertitude, la confiance, le nombre de valeurs de qualité des sols différentes au sein de la parcelle, et la résolution moyenne de la carte.

Certaines variables ont eu des effets ambigus sur la prise de décision. Il s'agit de la visualisation de l'incertitude, du nombre de valeurs d'incertitude différentes au sein de la parcelle, et de certaines variables socio-économiques (genre, expertise dans la production et l'utilisation de cartes de sol), et le niveau d'agrégation. Par exemple, la visualisation de l'incertitude (cartes séparées versus cartes à points) n'a pas d'effet clair sur la prise de décision, quel que soit le scénario : visualiser l'incertitude via des cartes séparées diminue simplement la probabilité de sanctuariser les parcelles. Le fait qu'un effet n'ait été observé que dans un cas sur quatre rend difficile de conclure à un réel effet sur la prise de décision. Nous invitons donc le lecteur à se référer au *Tableau 1* pour prendre connaissance de l'influence de ces autres variables ambiguës. Nous nous attarderons néanmoins sur les effets du niveau d'agrégation, un des focus de notre étude. On observe que l'agrégation réduit à la fois la probabilité de choisir d'artificialiser et de sanctuariser les sols, (cf. le signe négatif dans la régression multinomiale), et amène les répondants à se montrer indécis. L'effet marginal de l'agrégation est présenté dans la *Figure 4*. Nous pouvons y voir que quand le niveau le plus élevé (le niveau 4) est atteint, on observe des basculements entre les décisions « Oui » et « Je ne sais pas » et « Oui » et « Non », dans les scénarios d'artificialisation et de sanctuarisation respectivement. Enfin, les effets des niveaux autodéclarés de compréhension et d'expertise sont assez clairs. Un niveau de compréhension plus élevé est globalement associé à des probabilités plus faibles de se décider (décisions « Oui » ou « Non »). La facilité perçue de l'exercice encourage la prise de décision dans le scénario d'artificialisation, tandis que l'intégration de l'incertitude produit l'effet inverse : elle tend à accroître l'indécision.

Les niveaux de qualité des sols et d'incertitude sont les deux seules variables dont l'effet sur la prise de décision est constant.

Figure 3 : Répartition des répondants suivant les structures où ils sont en poste.

Figure 3: Distribution of respondents according to the organizations they work for.



Pour visualiser leurs effets plus en détail, leurs prédictions marginales ont été calculées (Figure 4).

Nous observons que plus la qualité augmente (d'un niveau), plus la probabilité d'artificialiser diminue ($RR = 0,742$, soit une baisse de 25 %), et plus la probabilité de sanctuariser augmente ($RR = 1,464$, soit une augmentation de 50 %). L'effet inverse est observé sur les décisions de ne pas artificialiser et ne pas sanctuariser, respectivement. Il est intéressant de constater que les courbes de prédictions marginales se croisent en amont des seuils de décision (17 / 40 % et 18 / 60 %), ce qui indique une réticence des répondants à artificialiser ou ne pas sanctuariser des parcelles légèrement en deça du seuil. En outre, on observe sur la Figure 4 que, dans le scénario de sanctuarisation, la probabilité de ne pas se décider est la plus élevée lorsque la valeur de la qualité des sols se situe près du seuil de décision. En revanche, dans le scénario d'artificialisation, cette probabilité reste constamment élevée pour des niveaux de qualité des sols inférieurs au seuil. Ces résultats indiquent que les répondants étaient plus réticents à prendre une décision concernant les parcelles de faible qualité dans le scénario de conversion.

Plus l'incertitude augmente, plus la probabilité de se décider (décision « Oui » ou « Non ») diminue. La Figure 4 présente plus en détail les effets de chacun des quatre niveaux d'incertitude. En particulier, le niveau d'incertitude qui est associé à un basculement dans les décisions prises n'est pas le même dans les deux scénarios : dans le scénario d'artificialisation, le basculement est observé plus tôt que dans le scénario de sanctuarisation.

3.3. Identification des préférences de représentations cartographiques

Les scores Elo de toutes les cartes ont été calculés à partir des 263 x 10 choix effectués par les répondants, et ont été mis en relation avec le type de visualisation de l'incertitude (Figure 5a) et le niveau d'agrégation (Figure 5b). Des ANOVA à un facteur ont été réalisées afin de déterminer si les différences observées entre les scores Elo moyens des cartes pour chaque niveau d'agrégation étaient statistiquement significatives. La Figure 5 montre que les utilisateurs finaux préfèrent significativement les cartes séparées aux cartes à points, et préfèrent les cartes modérément agrégées (niveau 2) aux cartes raster et très agrégées (niveaux 0 et 3). Les scores Elo des cartes légèrement agrégées (niveau 1) ne diffèrent pas significativement de ceux des cartes des autres niveaux.

Des analyses complémentaires ont confirmé que ces préférences sont stables, dans tous les grands groupes d'utilisateurs représentés : chercheurs, acteurs opérationnels, experts en données sol, hommes, personnes ayant été affectées au scénario « artificialisation » et personnes ayant été affectées au scénario « sanctuarisation ». Même si les préférences sont avant tout personnelles, nous remarquons que le profil des utilisateurs ne les modifie pas.

4. DISCUSSION

4.1 Implication des utilisateurs via une enquête en ligne

Nous avons analysé, à travers une enquête menée auprès d'utilisateurs, l'impact de la représentation de l'information sur la décision d'aménagement, ainsi que leur positionnement le long du compromis entre incertitude et information induit par l'agrégation. Nous avons retenu 263 réponses d'utilisateurs travaillant dans des structures variées, ce qui surpasse le nombre d'individus impliqués dans des études similaires (Deitrick, 2012 ; Hope et Hunter, 2007b,a). La conception du questionnaire a nécessité plusieurs enquêtes pilotes, des tests et ajustements successifs. Un défi majeur était d'évaluer et d'accroître la « *visualization literacy* » (Boy et al., 2014) des répondants, c'est à dire leur capacité à interpréter correctement les cartes, afin qu'ils puissent prendre leurs décisions et indiquer leurs préférences en toute conscience. À cette fin, une part importante du

Tableau 1 : Résultats des logits multinomiaux pour les décisions d'artificialisation et de sanctuarisation. Les signes + et - indiquent respectivement une influence positive et négative sur la capacité à prendre une décision (soit "Oui" – en haut – ou "Non" – en bas).

Table 1: Multinomial logit results on soil sealing versus conservation decisions. + and – signs respectively indicate a positive and negative influence of the capacity to make a decision (either "Yes" – top part – or "No" – bottom part).

		Décision d'artificialisation		Décision de sanctuarisation	
	Variables	Signe du coefficient	RRR	Signe du coefficient	RRR
OUI	Niveau d'agrégation	-	0,747**	-	0,790**
	Cartes séparées			-	0,723*
	Qualité des sols	-	0,742***	+	1,464***
	Niveau d'incertitude	-	0,272***	-	0,308***
	Nombre de valeurs d'incertitude dans la parcelle			-	0,620**
	Genre (être un homme)			-	0,589**
	Classe d'âge	-	0,840*		
	Compréhension	-	0,604***	-	0,776*
	Prise en compte de l'incertitude	-	0,640***	-	0,638***
	Facilité perçue de l'exercice	+	1,393***		
	Confiance dans la réponse				
	Expertise en utilisation de cartes de sol				
	Expertise en production de cartes de sol				
NON	Niveau d'agrégation			+	1,376**
	Cartes séparées				
	Qualité des sols	+	1,480***	-	0,573***
	Niveau d'incertitude	-	0,569***	-	0,532***
	Nombre de valeurs d'incertitude dans la parcelle				
	Genre (être un homme)				
	Classe d'âge				
	Compréhension	-	0,528***		
	Prise en compte de l'incertitude	-	0,773**		
	Facilité perçue de l'exercice	+	1,331***		
	Confiance dans la réponse			-	0,727**
	Expertise en utilisation de cartes de sol			+	1,408***
	Expertise en production de cartes de sol			-	0,672***
NE SAIT PAS		Référence		Référence	
	Observations	1350		1270	

Figure 4 : Impact du niveau d'agrégation (haut), du niveau de qualité des sols (milieu) et du niveau d'incertitude (bas) sur les décisions d'artificialisation (gauche) et de sanctuarisation (droite).

Figure 4: Impact of aggregation level (above), soil quality (middle) and uncertainty (below) on the probabilities of decision outcomes in the soil sealing (left) and conservation (right) scenarios.

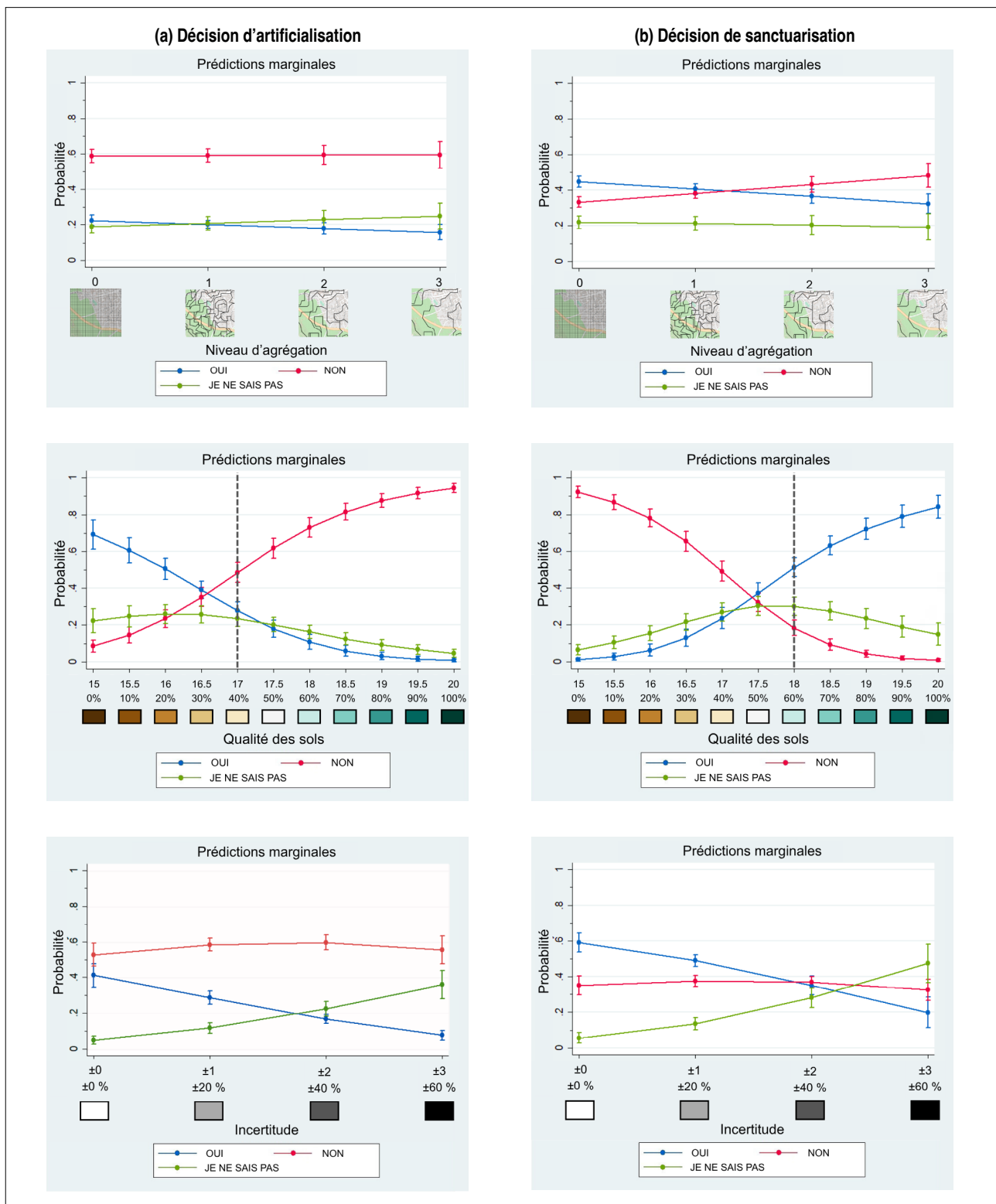
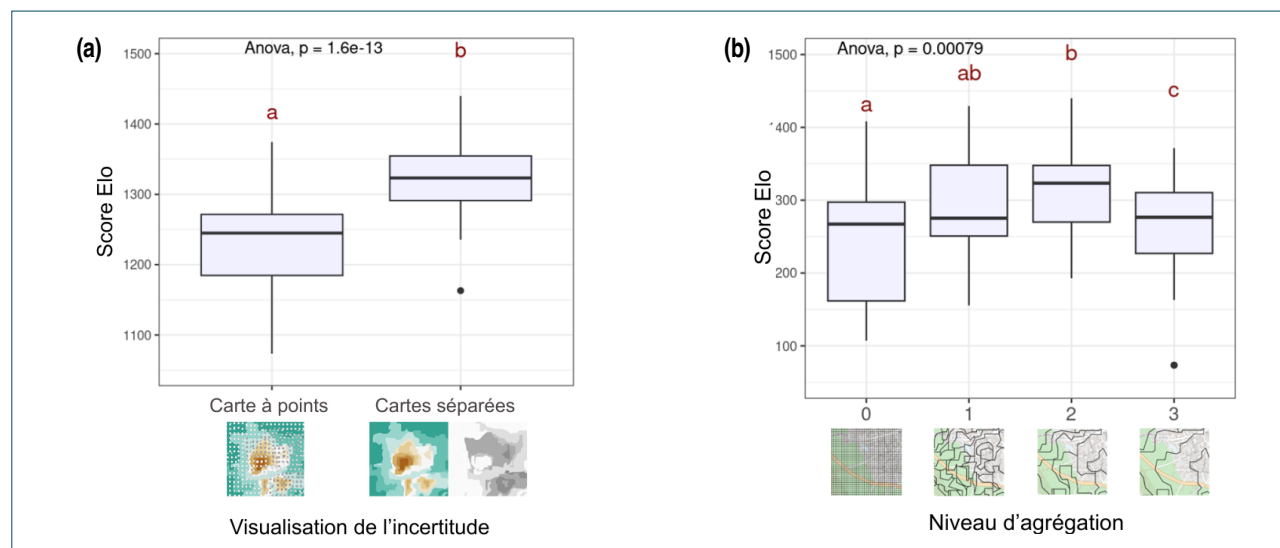


Figure 5 : Boxplots des scores Elo des cartes, en fonction de (a) la façon dont l'incertitude y est visualisée et (b) leur niveau d'agrégation.

Figure 5: Boxplots of Elo scores according to the modalities of (a) uncertainty visualization and (b) aggregation level.



questionnaire a été consacrée à la formation des répondants : nous avons créé un tutoriel de 10 minutes, qui a été bien accueilli par les participants. La durée des phases « décision » et « préférences » a ensuite été fixée de manière à capitaliser sur l'expérience nouvellement acquise des répondants, tout en veillant à ce que le questionnaire reste d'une durée raisonnable.

Nous sommes convaincus que la plupart des défis restant à relever dans le domaine de la CSMS et de la cartographie de ressources naturelles en général, ne pourront être surmontés sans l'inclusion des utilisateurs finaux dans le processus cartographique, et l'identification de leurs besoins.

Pour la réalisation d'enquêtes, nous formulons les recommandations suivantes :

- Conduire des entretiens préliminaires avec les acteurs cibles pour s'assurer que les motivations de l'étude (ici : adapter les cartes de qualité des sols à la prise de décision) font écho à des besoins réels : cela permettra d'inciter le public ciblé à répondre à l'enquête.
- Inclure un tutoriel, pour former les répondants à la lecture de données qu'ils n'ont pas l'habitude d'interpréter (ici : des cartes de qualité des sols agrégées et affectées d'une incertitude).
- S'assurer que l'enquête ne soit pas trop longue, car sa durée est le principal facteur limitant le nombre de réponses obtenues.

4.2 Exploration de la perception du compromis entre incertitude et résolution spatiale

Dans Courteille *et al.* (2024), nous avons présenté l'agrégation spatiale comme un moyen de réduire l'incertitude des valeurs de qualité des sols affichées. En contrepartie, agréger l'information spatiale induit une perte de détails qui pourrait influencer la prise de décision. Le travail présenté ici nous éclaire sur la perception de ces deux effets par les utilisateurs.

Nos résultats montrent que les utilisateurs finaux préfèrent généralement des cartes modérément agrégées, plutôt que des cartes raster ou fortement agrégées. C'est la première fois que les préférences des utilisateurs concernant le niveau d'agrégation spatiale d'un produit cartographique sont évaluées. Ces résultats globaux vont dans le sens de l'hypothèse que nous avons formulée dans Courteille *et al.* (2024), selon laquelle les utilisateurs finaux pourraient préférer des produits cartographiques moyennement agrégés, présentant une incertitude globale bien plus faible, tout en conservant un niveau de détail spatial suffisant.

D'après Arrouays *et al.* (2020), les utilisateurs finaux ont tendance à percevoir l'information spatiale comme plus précise lorsqu'elle est présentée à une résolution fine, comparée à la même information affichée à une résolution plus grossière. Nous pensons cependant que ce biais persiste parce que les utilisateurs ne sont généralement pas suffisamment conscients du niveau élevé d'incertitude qui accompagne souvent les données à haute résolution. Le fait que les répondants aient

réalisé un exercice de prise de décision dans lequel ils étaient explicitement invités à tenir compte de l'incertitude avant d'indiquer leurs préférences semble avoir empêché ce biais d'influencer celles-ci. Nos résultats montrent que les données à haute résolution ne sont pas perçues comme un support d'information privilégié par les utilisateurs finaux lorsqu'elles sont associées à une forte incertitude – les participants sont au contraire prêts à sacrifier une partie de la précision spatiale pour faciliter leur prise de décision. De plus, de nombreux commentaires ont insisté sur le fait que les cartes agrégées sont bien plus ergonomiques, leurs couleurs étant plus faciles à interpréter, contrairement aux cartes raster dont la pixellisation rend l'extraction d'information plus difficile. À bien des égards, les cartes agrégées semblent répondre aux besoins des décideurs en matière d'informations facilement compréhensibles (Neuendorf *et al.*, 2018), ainsi qu'en matière de réduction de l'incertitude (Borowski et Hare, 2007).

Les cartes agrégées ont cependant parfois été choisies malgré une résolution objectivement trop grossière pour appuyer des décisions à l'échelle de la parcelle. Cela nous conduit à mettre en garde contre un usage inapproprié de l'agrégation spatiale comme moyen de réduire artificiellement l'incertitude cartographique. Lorsque les utilisateurs finaux ne peuvent pas prendre de décision à partir d'une carte dont la résolution correspond à l'échelle de décision – par exemple en raison d'une incertitude excessive – ils devraient faire face à cette incertitude, plutôt que de se tourner vers des cartes plus agrégées qui ne feraient que rendre la décision artificiellement plus simple. Parmi les options envisageables pour faire face à cette incertitude, on peut citer : se rendre sur place pour observer le sol avant de décider, collecter de nouvelles données sol ponctuelles permettant de réviser et d'affiner la carte de qualité des sols comme la CSMS le permet, appliquer le principe de précaution ou choisir de reporter la décision. De manière plus générale, pour gérer de manière appropriée les incertitudes, un dialogue entre les spécialistes des sols, les aménageurs et les décideurs est nécessaire (Lark *et al.*, 2022). Cette collaboration est importante, par exemple, pour établir des critères permettant de juger quels niveaux d'incertitude sont acceptables au regard des conséquences potentielles des décisions d'aménagement du territoire (Neuendorf *et al.*, 2018).

Nos recommandations relatives à l'agrégation sont donc les suivantes :

- Associer des futurs utilisateurs au développement du produit cartographique en recueillant leur avis sur le degré d'agrégation optimal pour leur prise de décision.
- Agréger la carte à cette échelle spatiale.
- Idéalement, présenter les cartes via une interface interactive pour que tout utilisateur puisse choisir le niveau d'agrégation le plus adapté à son scénario particulier de décision.

4.3 L'influence de l'incertitude sur la prise de décision

Même si, globalement, l'incertitude produit l'effet attendu sur la prise de décision (plus l'incertitude est grande, plus il est difficile de prendre une décision, quel que soit le scénario présenté), l'enquête nous a permis d'affiner cette observation. Tout d'abord, nous avons constaté que les répondants faisaient preuve d'une tolérance élevée à l'incertitude. L'analyse statistique que nous avons menée nous a permis d'identifier une valeur seuil au-delà de laquelle la proportion de réponses « Je ne sais pas » dépasse celle des décisions « Oui » / « Non » (qui correspond à une marge d'erreur de ± 2 ou ± 40 %, pour des plages de valeurs respectivement de [15, 20] et [0 %, 100 %]).

Cependant, l'effet de l'incertitude, à niveau de qualité des sols égal, est plus fort dans le cas d'une décision irréversible comme l'artificialisation des sols que dans le cas d'une décision réversible comme la conservation. Les individus semblent donc faire preuve de plus d'aversion au risque et de prudence dans le cas d'une artificialisation, tout en tolérant un niveau d'incertitude plus élevé lorsqu'il s'agit d'un choix réversible comme la conservation. Cela implique que le compromis entre résolution et incertitude varie selon le type de décision à prendre. Les cartes à fournir ne seront donc pas nécessairement les mêmes, ce qui plaide, une fois de plus, en faveur d'interfaces interactives permettant aux utilisateurs finaux d'adapter la résolution à leur situation particulière.

Nos recommandations relatives à la communication de l'incertitude pour la prise de décision peuvent être formulées comme suit :

- Associer des futurs utilisateurs aux choix de représentation de l'information en leur faisant exprimer leur tolérance à l'incertitude.
- Si l'incertitude de la carte agrégée à l'échelle de prise de décision dépasse le seuil de tolérance, les utilisateurs risquent de ne pas réussir à intégrer l'incertitude : nous recommandons de diminuer l'incertitude à la source, en augmentant la densité des observations terrain ou en améliorant les modèles utilisés dans la procédure de CSMS.

5. CONCLUSION

Les cartes de qualité des sols comportent généralement une incertitude non négligeable qu'il convient de représenter de manière intelligible pour les utilisateurs finaux. En consultant ces derniers à travers cette étude, nous avons pu identifier les représentations de cette incertitude les plus adéquates, et formuler des recommandations à destination des producteurs de cartes. Nous espérons que ces résultats aideront ces derniers à répondre aux besoins des utilisateurs finaux, et conduiront à une utilisation plus efficace des cartes environnementales dans les politiques publiques.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier INRAE pour le financement de la thèse de Léa Courteille. Ils adressent également leurs sincères remerciements à l'ensemble des répondants pour le temps qu'ils ont consacré à cette enquête, ainsi que pour la qualité et la pertinence de leurs commentaires.

Cette étude n'aurait pas été possible sans le soutien des nombreuses personnes qui ont contribué à la diffusion du questionnaire au sein de leurs réseaux professionnels, numériques et parfois personnels. Les auteurs souhaitent tout particulièrement remercier Laurent Alborino, Maud Bessagnet, Jean-Pierre Chéry, Céline Collin-Bellier, Bruno Depresle, Patrick Duchez, Anne Fromage-Mariette, Stella Gass, Frédéric Portet, Nicolas Py, Davide Rizzo, Anouk Robillard et Joëlle Sauter pour leur précieuse contribution.

BIBLIOGRAPHIE

- Angelini M.E., Heuvelink G.B.M., Lagacherie P. (2023). A multivariate approach for mapping a soil quality index and its uncertainty in southern france. *European Journal of Soil Science*, 74(2):e13345, 2023. doi: 10.1111/ejss.13345.
- Arrouays D., Grundy M.G., Hartemink A.E., Hempel J.W., Heuvelink G.B.M., Hong S.Y., Lagacherie P., Lelyk G., McBratney A.B., McKenzie N.J., Mendonca-Santos M.d.L., Minasny B., Montanarella L., Odeh I.O.A., Sanchez P.A., Thompson J.A., Zhang G.-L. (2014). Globalsoilmap: Toward a fineresolution global grid of soil properties. *Advances in agronomy*, 125:93–134, 2014. doi:10.1016/B978-0-12-800137-0.00003-0.
- Arrouays D., McBratney A.B., Bouma J., Libohova Z., Richer-de Forges A.C., Morgan C.L.S., Roudier P., Poggio L., Mulder V.L. (2020). Impressions of digital soil maps: The good, the not so good, and making them ever better. *Geoderma Regional*, 20:e00255, 2020. doi:10.1016/j.geodrs.2020.e00255.
- Balestrat M., Barbe E., Chery J.-P., Lagacherie P., Tonneau J.-P. (2011). Reconnaissance du patrimoine agronomique des sols: une démarche novatrice en languedoc-roussillon. *Noréis. Environnement, aménagement, société*, (221):83–96, 2011.
- Borowski I., Hare M. (2007). Exploring the gap between water managers and researchers: difficulties of model-based tools to support practical water management. *Water Resources Management*, 21:1049–1074, 2007.
- Boy J., Rensink R.A., Bertini E., Fekete J.D. (2014). A principled way of assessing visualization literacy. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 20(12), 1963–1972.
- Brown J.D. (2004). Knowledge, uncertainty and physical geography: towards the development of methodologies for questioning belief. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 29(3):367–381.
- Clarke V., Braun V. (2017). Thematic analysis. *The journal of positive psychology*, 12(3):297–298. doi: 10.1080/17439760.2016.1262613.
- Courteille L., Lagacherie P., Boukhelifa N., Lutton E., Tardieu L. (2024). Using spatial aggregation of soil multifunctionality maps to support uncertainty-aware planning decisions. *European Journal of Soil Science*. doi: 10.1111/ejss.13523.
- Courteille L. (2025). *Impact of cartographic representation of uncertainty for decision-making: the case of soil quality in land-use planning* (Doctoral dissertation, Institut agro montpellier).
- Courteille L., Tardieu L., Boukhelifa N., Lutton E., Lagacherie P. (2025). What is the best way to communicate the uncertainty of a digital soil mapping product? some lessons from an end-user survey. *Geoderma*, 459:117302.
- Courteille L., Tardieu L., Boukhelifa N., Lutton E., Lagacherie P. (2026). Exploring the impact of map uncertainty on soil sealing versus conservation decisions. *Landscape and Urban Planning*, 274:105694.
- Deitrick S. (2012). Evaluating implicit visualization of uncertainty for public policy decision support. In *Proc. AutoCarto*.
- Dovers S., Norton T., Handmer J. (2017). Ignorance, uncertainty and ecology: key themes. In *Ecology, Uncertainty and Policy*, pages 1–25. Routledge.
- Elo A.E., Sloan S. (2008). *The rating of chessplayers: Past and present*. Ishi Press International. 220 pages.
- Goodspeed R. (2017). Research note: An evaluation of the elo algorithm for pairwise visual assessment surveys. *Landscape and Urban Planning*, 157:131–137. doi: 10.1016/j.landurbplan.2016.06.009.
- Greiner L., Nussbaum M., Papritz A., Zimmermann S., Gubler A., Grêt-Regamey A., Keller A. (2018). Uncertainty indication in soil function maps—transparent and easy-to-use information to support sustainable use of soil resources. *Soil*, 4(2):123–139, 2018. doi:10.5194/soil-4-123-2018.
- Grêt-Regamey A., Weibel B., Bagstad K.J., Ferrari M., Geneletti D., Klug H., Schirpke U., Tappeiner U. (2014). On the effects of scale for ecosystem services mapping. *PloS one*, 9(12):e112601, 2014. doi: 10.1371/journal.pone.0112601.
- Heuvelink G.B.M. (2014). *Uncertainty quantification of globalsoilmap products*. GlobalSoilMap; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, pages 335–340, 2014.
- Hope S., Hunter G.J. (2007a). Testing the effects of positional uncertainty on spatial decisionmaking. *International Journal of Geographical Information Science*, 21(6):645–665.
- Hope S., Hunter G.J. (2007b). Testing the effects of thematic uncertainty on spatial decision-making. *Cartography and Geographic Information Science*, 34(3):199–214.
- Jansen J., Woolley S.N.C., Dunstan P.K., Foster S.D., Hill N.A., Haward M., Johnson C.R. (2022). Stop ignoring map uncertainty in biodiversity science and conservation policy. *Nature Ecology & Evolution*, 6(7):828–829. doi: 10.1038/s41559-022-01778-z. URL <https://doi.org/10.1038/s41559-022-01778-z>.
- Karlen D.L., Mausbach M.J., Doran J.W., Cline R.G., Harris R.F., Schuman G.E. (1997). Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial). *Soil Science Society of America Journal*, 61(1):4–10.

- Lark R.M., Chagumaira C., Milne A.E. (2022). Decisions, uncertainty and spatial information. *Spatial Statistics*, 50:100619. doi: 10.1016/j.spasta.2022.100619.
- Loiseau T., Richer-de-Forges A.C., Roudier P., Ducommun C., Chen S., Lagacherie P., Arrouays D. (2020). Essais de représentation cartographique de l'incertitude pour les utilisateurs de cartographies des sols par modélisation statistique. *Etude et Gestion des Sols*, 27(1): 257–275.
- Maring L., Castañeda del Álamo C., Alvaro Fuentes J., Stuczynski T., Hagemann N., Dietze V., Bartke S. (2019). Policy brief "soil quality in spatial planning". Technical report, European Commission.
- Montanarella L. (2017). Soil sealing and land take as global soil threat: the policy perspective. In *Urban expansion, land cover and soil ecosystem services*, pages 291–295. Routledge.
- Neuendorf F., von Haaren C., Albert C. (2018). Assessing and coping with uncertainties in landscape planning: an overview. *Landscape Ecology*, 33:861–878. doi: 10.1007/s10980-018-0643-y.
- Padarian J., McBratney A.B. (2023). Quadmap: Variable resolution maps to better represent spatial uncertainty. *Computers & Geosciences*, 181:105480, 2023. doi: 10.1016/j.cageo.2023.105480.
- Rabot E., Guisresse M., Pittatore Y., Angelini M., Keller C., Lagacherie P. (2022). Development and spatialization of a soil potential multifunctionality index for agriculture (agri-spmi) at the regional scale. case study in the occitanie region (france). *Soil Security*, 6:100034. doi: 10.1016/j.soisec.2022.100034.
- Vaysse K., Heuvelink G.B.M., Lagacherie P. (2017). Spatial aggregation of soil property predictions in support of local land management. *Soil Use and Management*, 33(2):299–310, 2017. doi: 10.1111/sum.12350.
- Ward J.H. (1963). Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American Statistical Association*, 58(301):236–244. doi: 10.1080/01621459.1963.10500845.

ANNEXE

Tableau 2 : Réseaux à travers lesquels l'enquête a été diffusée

Table 2: *Networks in which the survey has been distributed*

Groupe de parties prenantes	Réseau/institution	Moyen de diffusion
Urbanistes	Fédération nationale des agences d'urbanisme (FNAU)	Entretien (4 personnes)
	Fédération nationale des SCoT (FéDéSCoT)	Entretien (1 personne)
	Réseau ZAN	Entretien (1 personne)
	Office Français de la Biodiversité (OFB)	Liste de diffusion
	FedeSCoT	Liste de diffusion
	Plateforme Idealco (collaborative platform for the public sector)	Message sur la plateforme
	DGALN	Contacts personnels
	Institut Paris Région	Contacts personnels
	Montpellier Métropole	Contacts personnels
	SAFER Occitanie	Contacts personnels
	DRAAF Occitanie	Contacts personnels
	DRAAF Normandie	Contacts personnels
	Région Île-de-France	Contacts personnels
	Communes forestières	Contacts personnels
	Réseau ADEME "Évaluation de la qualité des sols"	Liste de diffusion
	RMT "Sols et territoires"	Liste de diffusion
	Commissariat Général au Développement Durable	Liste de diffusion
Géomaticien.ne.s	GeoRezo	Forum internet
	Office National des Forêts (ONF)	Contacts personnels
	Institut Géographique National	Liste de diffusion
	OpenIG (CRIGE Occitanie)	Newsletter
	KaruGéo (CRIGE Guadeloupe)	Newsletter
	IDéO (CRIGE Bourgogne-Franche-Comté)	Newsletter
	RGD Savoie-Mont-Blanc (CRIGE Savoie)	Newsletter et post LinkedIn
	Pôle national Theia	Contacts personnels
Expert.e.s sol	Sol'En Vie	Billet de blog
	AFES (Association Française d'Étude des Sols)	Liste de diffusion
Chercheur.euse.s	UMR LISAH	Liste de diffusion
	UMR TETIS	Liste de diffusion
	UMR Espace-Dev	Liste de diffusion
	UMR LSE	Liste de diffusion
	UMR PSAE	Liste de diffusion
	UMR LESSEM	Liste de diffusion
	Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (CIRED)	Liste de diffusion
	Partenaires du projet MUSE	Liste de diffusion
	Partenaires du projet Idefese	Contacts personnels
	Plateforme "Évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques" (Efese)	Message sur la plateforme
	Observatoire de l'environnement nocturne	Contacts personnels
	Géotamtam	Liste de diffusion
	Pedometron	Newsletter
	Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité (FRB)	Twitter

