



# RAPPORT

## Les sols de la Métropole Rouen Normandie

De l'élaboration du Référentiel pédologique à  
l'évaluation et l'analyse territorialisée de leurs  
fonctions écologiques

Rédacteur  
Patrick Le Gouée

- Juin 2024 -



Vue paysagère : vallée de l'Aubette (Saint-Léger-du-Bourg-Denis)

Profil pédologique de gauche : NÉOLUVISOL issu des limons de plateau quaternaires (Les Authieux-sur-le-Port-Saint-Ouen)

Profil pédologique de droite : RENDOSOL issu de la craie crétacée (Malaunay)

*Crédits photos : Patrick Le Gouée, 2023*

"La terre, encore humide de la rosée de la nuit, se faisait douce sous les pieds nus, exhalait cette odeur de vie qui monte du sol, aux premiers soleils de printemps."

Émile Zola, "La Terre"

## CITATION DE CE RAPPORT

Le Gouée P. 2024. Les sols de la Métropole Rouen Normandie. De l'élaboration du Référentiel pédologique à l'évaluation et l'analyse territorialisée de leurs fonctions écologiques, VigiSol, 213 pages.

Prospections et descriptions pédologiques des sondages : Pierre Lemoine et Patrick Le Gouée\*  
Ouverture et descriptions pédologiques des fosses : Patrick Le Gouée  
Production du Référentiel Sol, traitements géomatiques et analyses territorialisées : Patrick Le Gouée

\*Contact : [patrick.legouee@unicaen.fr](mailto:patrick.legouee@unicaen.fr) - ☎ 06 60 64 09 19

Lien LinkedIn : <https://www.linkedin.com/in/patrick-le-gou%C3%A9-45043020a/>

## REMERCIEMENTS

La présente étude n'aurait pas pu être menée à son terme sans le concours et la forte implication de structures et de personnes qu'il convient ici de remercier.

Je remercie chaleureusement la Métropole Rouen Normandie pour la confiance qu'elle nous a accordé en nous missionnant pour la production et la valorisation des données Sol sur son territoire dans le cadre de la révision de son SCOT et de son PLUi.

Au sein de la Métropole, mes remerciements vont plus particulièrement à Marlène Minor-Enot, de la Direction de la Planification Urbaine, à Amélie Arnaudet, de la Direction de la Transition Environnementale, et à Estelle Husson, du Service Grand Cycle de l'Eau, pour leur encadrement, leur bienveillance, leur curiosité et leur professionnalisme.

Le bon déroulement des prospections pédologiques sur tout le territoire a nécessité une contribution forte des collectivités métropolitaines qui nous ont facilité l'accès aux parcelles. Je leur adresse mes plus sincères remerciements.

Je remercie également les propriétaires et les exploitants agricoles qui ont bien voulu nous donner leur accord pour ouvrir, décrire et échantillonner les fosses pédologiques sur les 30 sites référents. Sans eux, la connaissance des sols de la Métropole serait aujourd'hui incomplète.

.

# Plan du rapport

<b>Introduction .....</b>	<b>5</b>
<b>La prise en compte des sols : un enjeu pour les territoires afin de définir la trajectoire du ZAN .....</b>	<b>7</b>
1. <i>Présentation de la ressource en Sol .....</i>	<i>8</i>
1.1. Sol et Pédogenèse .....	8
1.1.1. Les sols issus de la carbonatation .....	10
1.1.2. Les sols issus de la brunification .....	10
1.1.3. Les sols issus du lessivage .....	10
1.1.4. Les sols issus de la podzolisation.....	10
1.1.5. Les sols issus de l'hydromorphie.....	10
1.2. Sols et Propriétés édaphiques .....	11
1.2.1. Les propriétés physiques : notion de texture et de structure .....	11
1.2.2. Les propriétés chimiques : notion de complexe argilo-humique, de capacité d'échange cationique, de bases échangeables, de taux de saturation et de pH .....	12
1.2.3. Les propriétés biologiques : notion d'aération, de transformation et de stockage.....	12
1.3. Fonctions et services écosystémiques .....	13
1.3.1. Les fonctions du sol .....	13
1.3.2. Les services rendus par les sols .....	13
1.3.3. Évaluer les services écosystémiques par des indicateurs de fonctionnalité des sols. ....	14
2. <i>Les sols et le contexte réglementaire depuis la loi Climat et Résilience .....</i>	<i>15</i>
2.1. De la consommation d'espace (2D) à l'artificialisation (3D) .....	15
2.2. Définir et mesurer la multifonctionnalité des sols : l'outil MUSE de l'ADEME .....	16
2.3. La place des sols dans les documents d'urbanisme de la Métropole Rouen Normandie .....	17
2.3.1. Objectifs et Cahier des Clauses Particulières (CCP) entre MRN et VigSol .....	19
2.3.2. Durée de l'étude.....	20
<b>Méthodologies déployées .....</b>	<b>21</b>
1. <i>La production des données Sol sur le territoire de MRN .....</i>	<i>22</i>
1.1. L'acquisition des données ponctuelles : sondages et fosses pédologiques .....	22
1.1.1. Le positionnement des sites d'échantillonnage à la tarière .....	23
Premier critère de positionnement des points de sondage .....	23
Second critère de positionnement des points de sondage .....	24
1.1.2. Modalités de caractérisation des sols .....	25
1.1.3. Les variables descriptives des sols à partir des sondages tarière.....	25
Considérations générales.....	26
Description des profils et horizons. ....	26
Description des caractères principaux.....	27
La couleur .....	27
La texture.....	27
Les éléments grossiers.....	28
L'hydromorphie.....	28
Les carbonates de calcium et de magnésium .....	28
1.1.4. Des données Sol complétées par l'ouverture de fosses pédologiques .....	29
Les critères du nombre et du positionnement des fosses pédologiques .....	29
Les variables descriptives des sols de fosse.....	29
Echantillonnage des fosses et données analytiques de laboratoire. ....	30

1.2. Des données ponctuelles à la représentation cartographique des sols .....	30
1.2.1. Prédiction du contenu pédologique sur le territoire de la MRN .....	30
1.2.2. La délimitation des sols .....	31
1.2.3. Construction de la maquette .....	32
1.2.4. Numérisation de la maquette et sémiologie .....	33
1.2.5. Concepts mobilisés et méthode de spatialisation des Unités Cartographiques de Sol.....	34
1.3. Stockage et contrôle qualité des bases de données via la plateforme DONESOL Web .....	34
2. <i>Les potentialités agronomiques des sols</i> .....	35
2.1. Le modèle SQUAT .....	36
2.1.1. Le choix d'un modèle additif .....	36
2.1.2. Les données d'entrée du modèle .....	36
L'épaisseur des sols .....	36
La texture des horizons de surface .....	36
Le déficit hydrique .....	37
L'exposition des versants .....	38
L'hydromorphie des sols .....	38
Les pentes excessives.....	39
2.2. Déclinaison du modèle SQUAT en fonction des orientations de production agricole .....	39
2.2.1. Les paramètres d'entrée modulés en système maraîchage : texture et épaisseur .....	40
2.2.2. Les paramètres d'entrée modulés en système d'élevage : texture, épaisseur et hydromorphie .....	41
2.2.3. Un modèle pour 3 scénarios .....	42
2.3. La nécessaire étape de validation et de vérification du modèle SQUAT.....	43
2.4. Les Unités Spatiales d'Intégration (USI).....	44
3. <i>L'aléa Érosion hydrique des sols</i> .....	44
3.1. Le modèle SCALES .....	45
3.1.1. Éléments de définition .....	46
3.1.2. Données mobilisées .....	47
A propos du climat.....	47
Pour les sols. ....	47
Concernant le relief .....	47
L'occupation du sol .....	47
3.1.3. Les caractéristiques du modèle.....	47
Notions de base .....	47
Nature des données d'entrée .....	48
3.1.4. Les étapes de la modélisation .....	52
Cas particulier de la modélisation SCALES en Zone Naturelle .....	54
3.1.5. Classification des données et conversion des classes en niveaux de pression érosive .....	54
3.2. Les Unités Spatiales d'Intégration des données SCALES.....	55
4. <i>La multifonctionnalité des sols</i> .....	55
4.1. Le modèle MUSE .....	55
4.1.1. Les choix des fonctions pour caractériser la multifonctionnalité des sols en milieu faiblement anthropisé (zones A, N et AU) .....	56
4.1.2. L'évaluation des 4 fonctions et de la multifonctionnalité des sols en milieu faiblement anthropisé (zones A, N et AU) .....	57
L'évaluation de la fonction de biomasse .....	57
L'évaluation de la fonction régulation du cycle de l'eau .....	58
L'évaluation de la fonction réservoir de carbone.....	61
L'évaluation de la fonction réservoir de biodiversité du sol.....	62
L'évaluation de la multifonctionnalité des sols .....	64
4.1.3. Les choix des fonctions pour caractériser la multifonctionnalité des sols en milieu fortement anthropisé (zones U) .....	64

La couche imperméabilisation .....	66
La couche densité du couvert arboré .....	66
Traitements géomatiques des deux couches Copernicus .....	67
4.2. Caractériser les fonctions des sols en milieu urbain .....	68
<b>Résultats .....</b>	<b>71</b>
1. <i>Le Référentiel Sol de la Métropole</i> .....	72
1.1. L'inventaire et la cartographie des sols en Zones A, N et AU .....	72
1.1.1. Positionnement et réalisation des sondages tarière et des fosses pédologiques .....	72
Une topographique très contrastée .....	72
Un contexte géologique étroitement lié aux caractéristiques orographiques .....	73
Des sondages théoriques aux sondages effectifs .....	74
Réalisation des sondages .....	76
Localisation des fosses pédologiques .....	77
Les étapes associées à l'ouverture et à l'étude des fosses pédologiques .....	77
1.1.2. Construction de la carte des sols .....	80
Le pastillage .....	80
1.1.3. Présentation des Unités Cartographiques de Sol sur le territoire de la Métropole Rouen Normandie .....	83
Le maquettage .....	83
La numérisation de la maquette .....	84
1.1.4. Les rendus cartographiques .....	86
Les Unités Cartographiques de Sol .....	86
Typologie des UCS en zones A, N et AU .....	100
Propriétés et caractéristiques édaphiques des UCS .....	102
1.1.5. Exemples de données descriptives et analytiques saisies et stockées dans DONESOL .....	115
1.2. La caractérisation des sols des 11 sites tests UP et URP .....	116
2. <i>Les potentialités agronomiques des sols</i> .....	122
2.1. Les potentialités agronomiques des sols en système conventionnel .....	122
2.2. Les potentialités agronomiques des sols en système maraîcher .....	123
2.3. Les potentialités agronomiques des sols en système élevage .....	124
3. <i>L'aléa Érosion des sols</i> .....	125
3.1. La sensibilité potentielle des milieux à l'érosion hydrique .....	125
3.1.1. Pression érosive induite par les couverts agricoles .....	125
3.1.2. Pression érosive induite par le relief .....	126
3.1.3. Pression érosive induite par la battance .....	127
3.1.4. La sensibilité potentielle des milieux à l'érosion .....	128
3.2. L'érosivité pluviale .....	129
3.3. L'aléa érosion des sols en zone A et la prédisposition à l'aléa en zone N .....	130
4. <i>La multifonctionnalité des sols</i> .....	133
4.1. Fonctions et multifonctionnalité en zones A, N, AU et UP/URP .....	133
4.1.1. La fonction de production de biomasse .....	133
4.1.2. La fonction de régulation du cycle de l'eau .....	135
4.1.3. La fonction de réservoir de carbone .....	137
4.1.4. La fonction de réservoir de biodiversité des sols .....	139
4.1.5. La multifonctionnalité des sols .....	141
4.2. Désagrégation de la classe 3 de MUSE : approche exploratoire en zone AU .....	143
4.3. La capacité fonctionnelle des sols en milieu urbain .....	145
4.3.1. L'imperméabilisation des sols sur le territoire de la MRN .....	145
4.3.2. La densité du couvert arboré sur le territoire de la MRN .....	147
4.3.3. La capacité fonctionnelle des sols dans la couche végétale urbaine .....	148

4.3.4. Désagrégation de la classe « capacité intermédiaire » pour extraire les mailles à capacité fonctionnelle assez élevée .....	149
<b>Analyse territoriale .....</b>	<b>152</b>
1. <i>Les enjeux en lien avec les potentialités agronomiques</i> .....	153
1.1. Les conditions de développement du maraîchage et leur impact sur la ressource en eau .....	154
1.2. Les zones de développement ou du maintien de l'élevage et leur lien avec les secteurs identifiés comme vulnérables par la stratégie foncière eau .....	155
1.3. Vulnérabilité de la ressource en eau et potentiel agronomique élevé dans les trois systèmes de production agricole. ....	158
1.4. La préservation des terres agricoles à fort potentiel agronomique en zone AU .....	163
1.5. Quel potentiel de développement d'une agriculture urbaine en zones UP et URP ?.....	165
1.6. Contexte et enjeux pour les sols à faible potentiel agronomique. ....	167
1.7. Quelle évolution du potentiel agronomique des sols avec le changement climatique ? .....	172
2. <i>Les enjeux liés à l'aléa et au risque d'érosion hydrique des sols</i> .....	175
2.1. De l'aléa au risque d'érosion hydrique .....	176
2.1.1. Quelle est la part des zones sensibles à l'érosion hydrique en zone A et en zone N ?.....	176
2.1.2. Quelles sont les communes et les secteurs les plus sensibles à l'érosion hydrique ? Cela concerne-t-il les zones AU ? La densification de ces secteurs ou leur urbanisation renforcerait-elle l'aléa érosion hydrique ? .....	176
2.2. Quels sont les secteurs à bon potentiel agronomique et à aléa érosion hydrique assez fort en système maraîcher et système d'élevage ? .....	180
2.3. Les captages AEP sont-ils caractérisés par un aléa érosion hydrique assez fort en connexion hydraulique avec des bétails ? .....	183
2.4. Quelle articulation entre l'aléa érosion hydrique selon SCALES et l'aléa défini par le BRGM ? .....	185
3. <i>Les enjeux mobilisant les fonctions et la multifonctionnalité des sols</i> .....	186
3.1. La régulation du cycle de l'eau des zones AU et la préservation de la ressource en eau .....	186
3.2. Les sols à fonction élevée de production de biomasse et de réservoir de biodiversité sont-ils les mêmes ? .....	188
3.3. Quelle relation peut-on établir entre les bons réservoirs de biodiversité des sols selon MUSE et les réservoirs de biodiversité et corridors écologiques de la TVB de la Métropole ? .....	188
3.4. Les zones UP et URP présentent-elles des réservoirs de biodiversité des sols favorables à la biodiversité des milieux ? .....	193
3.5. Où trouve-t-on les réservoirs de carbone des sols les plus importants ? .....	193
3.6. Peut-on circonscrire les territoires à forte multifonctionnalité des sols ? .....	197
3.7. De la fonction de régulation du cycle de l'eau au zonage d'eaux pluviales. ....	199
<b>Conclusion.....</b>	<b>201</b>
Références bibliographiques .....	204
Annexe 1.....	206
Table des figures.....	209

# Introduction

Depuis une vingtaine d'années, les pouvoirs publics ont mobilisé des outils réglementaires destinés à limiter les impacts défavorables de l'étalement urbain sur les milieux agricoles, naturels et forestiers (Lois SRU, Grenelles I & II, ALUR, Biodiversité ELAN). Si la loi Climat et Résilience du 22 août 2021 s'inscrit dans le prolongement des objectifs assignés par ces différentes lois concernant une consommation économe des espaces par les territoires, elle introduit un changement de paradigme puisque l'artificialisation issue de l'urbanisation n'est plus uniquement perçue comme le résultat d'un changement d'occupation du sol mais aussi comme une modification des fonctions biologiques, hydriques, climatiques et agronomiques des sols.

Désormais, il ne s'agit plus seulement de réduire la consommation des espaces considérés par les territoires comme naturels, agricoles et forestiers mais de juguler l'artificialisation des sols responsable de l'altération durable de tout ou partie des fonctions du sol par son occupation ou son usage. Après 2030, les collectivités devront s'engager dans une trajectoire vers le ZAN (Zéro Artificialisation Nette) qui sera le solde de l'artificialisation et de la renaturation des sols. La renaturation est un nouveau terme réglementaire introduit par la loi Climat et Résilience en réponse à l'artificialisation. Elle consiste en des actions de restauration ou d'amélioration de la fonctionnalité d'un sol, ayant pour effet de transformer un sol artificialisé en sol non artificialisé. La perte de fonctionnalité liée à l'artificialisation devra être compensée par des opérations de génie écologique et pédologique qui restaureront ou réintroduiront des fonctions comparables. Or, pour y parvenir, les collectivités devront disposer de données sur la fonctionnalité des sols pour localiser ce potentiel puis l'utiliser.

En 2017, un collectif associant le Cerema, l'Université Aix Marseille, la Chambre d'Agriculture de l'Indre, l'unité InfoSol de l'INRAE, le BRGM et l'IRSTV a proposé le projet MUSE « Intégrer la multifonctionnalité des sols dans l'élaboration des documents d'urbanisme » en partenariat avec les collectivités de Nantes Métropole, Châteauroux Métropole et la Métropole Aix-Marseille Provence. Porté par la suite par l'ADEME, le projet MUSE a bénéficié de l'évolution du contexte réglementaire (loi Climat et Résilience) pour apparaître officiellement en 2022 comme un outil d'accompagnement du ZAN pour la prise en compte des sols dans l'aménagement.

L'approche MUSE permet de construire une représentation cartographique de la multifonctionnalité des sols au regard des données disponibles sur le territoire. C'est cette disponibilité des données Sol qui devient prépondérante dans la démarche pour estimer la multifonctionnalité à une échelle de planification satisfaisante. Des données Sol au 1/250 000 suffiront pour une vision régionale (SRADDET), une précision plus importante doit être exigée pour accompagner la création ou la révision de documents d'urbanisme communaux ou supra-communaux (1/10 000 à 1/50 000).

Engagée depuis une dizaine d'années dans une transition sociale écologique à travers différents documents stratégiques réglementaires (SCOT, PLUi, PCAET, PLH, PDM, PBBE, PAT), la Métropole Rouen Normandie a saisi l'opportunité du ZAN pour concevoir le développement du territoire de manière plus durable et plus soutenable dans le cadre de la révision de ses documents d'urbanisme (SCOT et PLUi). Pour cela, la politique foncière et la planification urbaine de la Métropole doivent se renouveler et se fonder sur la caractérisation des sols du territoire, non plus dans une seule vision 2D et sur la seule occupation du foncier, mais sur la nature et la fonctionnalité des sols pour pouvoir organiser les activités humaines tout en respectant les grands équilibres naturels et les fonctionnalités

écologiques des milieux. Dans ce cadre, la Métropole a souhaité connaître la nature et la valeur de ses sols et se doter d'un outil d'aide à la décision pour orienter la planification urbaine.

Pour répondre au besoin de connaissance sur les sols, la Métropole a missionné l'association VigiSol qui s'implique depuis plus de 10 ans en région dans la production et la valorisation de bases de données Sol. VigiSol repose sur un partenariat entre la Safer de Normandie et Patrick Le Gouée, géographe-pédologue à l'Université de Caen Normandie et responsable scientifique et technique de deux programmes Sol labellisés sur le plan national (le Référentiel Régional Pédologique de Basse-Normandie et le Réseau de Mesure de la Qualité des Sols de Normandie) et d'un programme régional de cartographie des sols d'échelle 1/50 000.

La présente étude vise les zones A, N et AU de la Métropole (les zones NB et NA n'ont pas été retenues car déjà protégés dans le PLUi). Elle est articulée autour des objectifs suivants :

- Créer un Référentiel pédologique d'échelle fine (1/10 000 au 1/50 000 sur la MRN)
- Caractériser les différents types de sol suivant leur potentialité agronomique, leur prédisposition comme Sol de Zone Humide (SZH) et leur sensibilité à l'érosion hydrique
- Estimer la multifonctionnalité des sols selon la méthode MUSE
- Evaluer les conditions de transposition de l'étude en milieu urbain (zones UP et URP) selon cette même méthode

Elle témoigne de la volonté d'une métropole de disposer de connaissances fines sur les sols pour apporter de nouveaux éléments de nature à éclairer et orienter les choix à faire (ou opérer) dans le cadre de l'élaboration de ses politiques publiques afin d'enclencher la transformation indispensable du territoire et répondre aux nombreux enjeux auxquels elle doit faire face. Par ailleurs, elle souligne l'engagement pionnier de la Métropole Rouen Normandie à vouloir intégrer dès aujourd'hui dans sa planification territoriale le changement de paradigme sur les sols porté par le ZAN. Enfin et en lien avec le point précédent, elle propose une déclinaison d'échelle locale de l'outil MUSE sur l'évaluation et la cartographie de la multifonctionnalité des sols. Il s'agit là d'une première en Normandie et fait de la Métropole Rouen Normandie une des références nationales pour raisonner l'artificialisation des sols selon une approche fonctionnelle des sols à l'échelle d'une intercommunalité. A ce titre, elle préfigure pour les prochaines années une implication croissante des collectivités dans l'acquisition de ce type de données.

L'étude est composée de 4 parties. La première est consacrée à une présentation des sols et à la nécessité pour les territoires de les prendre en compte afin de définir la trajectoire du ZAN. La partie suivante détaille les méthodologies déployées pour produire les données Sol sur le territoire de Métropole Rouen Normandie et pour déterminer leur potentialité agronomique, le niveau d'aléa érosion hydrique qui leur est associé et leurs fonctions et leur multifonctionnalité. Le troisième volet de l'étude fait état des résultats issus de l'application des méthodes précédentes, résultats valorisés dans une dernière partie autour d'analyses territorialisées en appui à la gestion durable des enjeux à court et moyen termes concernant plus particulièrement l'urbanisation, l'adaptation au changement climatique et la préservation des ressources naturelles et de la biodiversité.

Patrick Le Gouée

# La prise en compte des sols : un enjeu pour les territoires afin de définir la trajectoire du ZAN

La prise en compte des sols est cruciale dans la planification et la gestion durable des espaces urbains et ruraux. Comprendre leurs caractéristiques permet d'optimiser l'utilisation des terres pour l'agriculture, le développement de l'urbanisme ou bien encore les programmes de conservation de la biodiversité. L'évaluation la qualité des sols est tout aussi essentielle pour déterminer leur capacité à produire de la biomasse alimentaire et non alimentaire, pour réguler le cycle de l'eau, pour stocker le carbone et pour soutenir les composantes écologiques des milieux.

Les enjeux territoriaux nécessitant de recourir à la connaissance des sols sont nombreux. Ils visent la préservation et la reconquête de la qualité de la ressource en eau, la résilience des espaces naturels et anthropisés aux impacts du changement climatique et la gestion de la croissance des zones urbaines pour limiter l'étalement urbain.

Une approche intégrée prenant en compte les caractéristiques des sols et les enjeux territoriaux est essentielle pour assurer un développement durable et résilient des territoires. La conservation et la gestion stratégique des sols permettent non seulement de répondre aux besoins actuels, mais aussi de préserver les ressources pour les générations futures. Elle repose sur une démarche interdisciplinaire associant agronomes, urbanistes, écologistes, économistes, géographes et pédologues.

C'est précisément l'esprit porté dans la révision du PLUi et du SCOT de la Métropole Rouen Normandie et par les différents services de la planification territoriale de la collectivité. C'est la raison pour laquelle il convient maintenant de présenter cette ressource naturelle que l'on appelle communément le sol et que les spécialistes définiront par le terme de couverture pédologique pour le distinguer d'une représentation qui en ferait une simple surface support.

## 1. Présentation de la ressource en Sol

### 1.1. Sol et Pédogenèse

Le Sol a été identifié comme ressource naturelle aussi vitale pour l'homme que l'eau et l'air à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle dans le cadre des travaux de recherche de Vassili Dokoutchaïev, géographe russe considéré unanimement comme le père fondateur de la Science du sol (Boulaine, 1989). Ces disciples ont essaimé à travers le monde leurs connaissances et leurs techniques de description et de cartographie des sols, favorisant ainsi au début du 20<sup>ème</sup> siècle l'émergence d'une nouvelle discipline scientifique : la Pédologie.

Le Sol est l'une des composantes physiques des milieux terrestres. Il est issu de la désagrégation mécanique d'une formation géologique sous l'effet des températures et des précipitations et de l'altération biochimique des minéraux constitutifs de cette formation en présence d'eau, d'oxygène et des acides organiques (Bruckler *et al.*, 2009). Les variations du climat vont entraîner une fragmentation de la roche en éléments de plus en plus fins et l'activité biologique va favoriser la transformation des minéraux primaires initiaux en minéraux secondaires, appelés néoformations et parmi lesquelles on peut citer les argiles minéralogiques.

Dans nos régions tempérées à influence océanique, la désagrégation mécanique et l'altération biochimique interviennent à part égale dans la dynamique de formation des sols. Avec le temps, le sol va progressivement s'épaissir au détriment du matériau géologique. A l'échelle d'une vie humaine, cela ne se voit pas. C'est la raison pour laquelle on considère que le sol est une ressource naturelle non renouvelable. Dans des contextes favorables, le sol aura besoin d'une centaine d'années pour s'épaissir d'1 cm (Baize, 2023). Dans le cas contraire, il lui faudra un millier d'années !

Dans une même région, la vitesse de développement d'un sol peut varier considérablement en raison des caractéristiques du relief qui va agir sur la redistribution des flux de chaleur et des flux hydriques. Ainsi, l'exposition et la pente des versants par rapport au rayonnement solaire et ses angles d'incidence vont générer des températures de surface au sol très contrastées. La déclivité et la morphologie des versants (convexités, concavités) ainsi que les conditions de site (interfluve, haut, milieu, bas de versant et fond de vallée) vont définir les conditions de saturation, de ressuyage et de dessèchement des sols. Cette variabilité spatiale des ambiances thermiques et hydriques à la surface et dans les sols va accélérer son développement (humidités sans excès et chaleur modérée que l'on peut observer en partie basale concave des versants exposés au sud) ou la ralentir (dessèchement et fraîcheur prolongés comme sur les ruptures de haut de versant convexe tourné vers le nord).

La transformation très progressive d'un matériau géologique en sol va s'exprimer par une évolution du mode d'assemblage des constituants originels puis par une disparition de la structure initiale et une modification de la nature des minéraux primaires. C'est ce que l'on appelle la pédogenèse. Avec le temps, celle-ci va se manifester visuellement par la formation de couches distinctes possédant des caractéristiques de couleur et de structure homogènes appelées horizons.

En Normandie, la formation des sols relève de deux processus : l'humification et l'oxydo-réduction. L'humification est un mécanisme de transformation de la matière organique fraîche en humus sous l'influence notamment de la matière vivante du sol (micro-organismes) et du climat. L'oxydo-réduction exprime la réaction d'une substance (fer, manganèse ou aluminium), l'amenant à un état oxydé ou réduit en raison d'un transfert d'électrons : l'oxydation correspondant à une perte d'électrons, la réduction à un gain d'électrons. Cette réaction est liée principalement aux caractéristiques physiques du milieu (excès d'eau...).

On associe à l'humification 4 types de pédogenèse : la carbonatation, la brunification, le lessivage et la podzolisation. On associe à l'oxydo-réduction 1 type de pédogenèse : l'hydromorphie. Ces différentes pédogenèses peuvent être combinés et confèrent au sol toutes ses spécificités. La carte des sols de la Normandie issue d'un travail d'harmonisation des Référentiels Régionaux Pédologiques de Basse-Normandie et de Haute-Normandie (Le Gouée, 2024), témoigne de la présence de ces 5 types de pédogenèse (cf. Fig.1). Les sols les plus couramment rencontrés relèvent de la brunification, du lessivage et de l'hydromorphie.

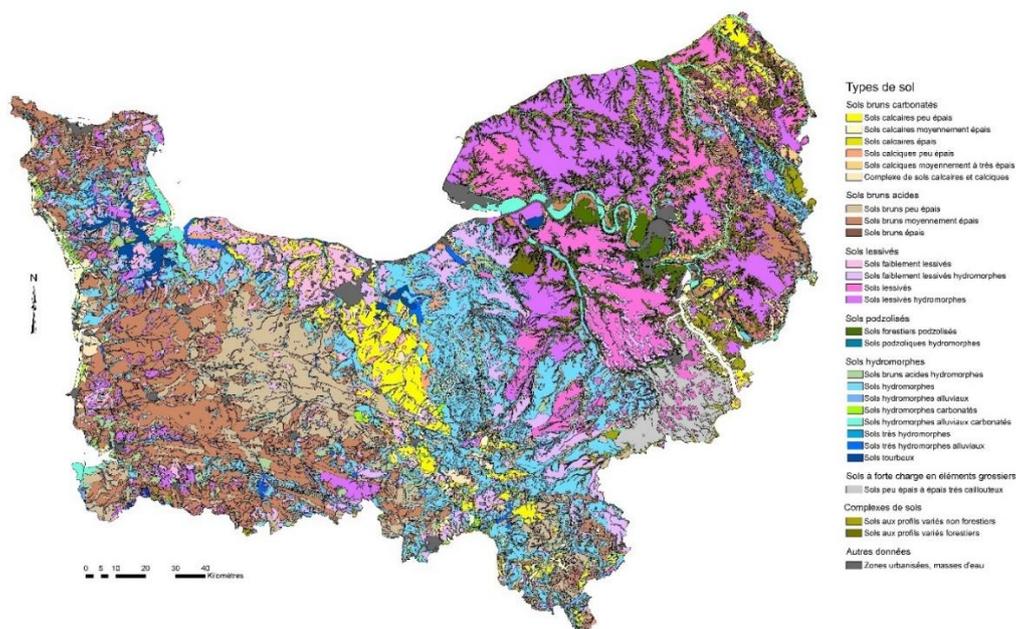


Fig. 1 : Carte des sols de la Normandie issue d'un travail d'harmonisation des Référentiels Régionaux Pédologiques de Basse-Normandie et de Haute-Normandie (Le Gouée P., 2024)

### 1.1.1. Les sols issus de la carbonatation

La carbonatation est liée à la présence de calcaire facilement soluble dans l'eau. Il provient généralement de la roche (calcaire, craie, marne). Le blocage par le calcaire soluble de l'humification à un stade précoce aboutit à la formation d'un horizon de surface très développé et à une structure aérée. Le calcaire soluble est soumis à des phases saisonnières de dissolution et de réprécipitation. Les sols issus de ce processus sont qualifiés de RENDOSOL (sol à 1 seul horizon calcaire) ou de CALCOSOL (sol à 2 horizons calcaires). Lorsque le calcaire soluble diminue significativement avec le temps, on parle alors de décarbonatation. Les sols liés à cette dynamique sont qualifiés de RENDISOL (sol à 1 seul horizon calcaire) ou de CALCISOL (sol à 2 horizons calcaires).

### 1.1.2. Les sols issus de la brunification

La brunification s'observe sur des substrats géologiques bien drainés et non calcaires qui libèrent en quantité suffisante de l'argile et des oxydes de fer. Ce processus permet ainsi la mise en place d'un complexe argile/humus avec une liaison des particules ferriques (pont ferreux) caractéristiques. Les RANKOSOLS (sols à 1 horizon) et les BRUNISOLS (sols à 2 horizons) sont affiliés à ce type de processus.

### 1.1.3. Les sols issus du lessivage

Le lessivage est un processus d'entraînement mécanique par les eaux de gravité des particules fines dispersées (argiles fines, hydroxydes de fer...). Ce lessivage s'opère depuis les horizons supérieurs appauvris et partiellement décolorés (éluviaux), vers les horizons profonds enrichis et plus colorés (illuviaux). Lorsque le lessivage entraîne un enrichissement significatif en argiles de la partie inférieure du sol, des difficultés de drainage peuvent survenir, avec un engorgement saisonnier. Les sols lessivés comportent la plupart du temps 3 horizons. Selon l'intensité du lessivage, on parle de NEOLUVISOL (peu lessivé) et de LUVISOL (lessivage marqué).

### 1.1.4. Les sols issus de la podzolisation

La podzolisation nécessite la présence d'un horizon de surface produisant des quantités massives de composés organiques qui migrent en profondeur. Ces composés organiques altèrent les minéraux argileux et entraînent le fer et l'aluminium vers la base du sol sous l'action des eaux pluviales. Les minéraux argileux se déplacent vers les horizons profonds. L'horizon supérieur ne contient plus que de fins grains de quartz et prend un aspect cendré. Les PODZOSOLS s'observent dans des espaces forestiers en présence de roches cristallines (granite) et sédimentaires détritiques cohérentes ou meubles (grès, sable).

### 1.1.5. Les sols issus de l'hydromorphie

L'hydromorphie est un phénomène de réduction ou d'oxydation du fer mobilisable induit par un état d'engorgement permanent ou temporaire du milieu qui se manifeste par la présence d'une nappe d'eau superficielle ou profonde. Le phénomène est différent selon l'horizon considéré (de surface ou profond) et la durée de l'hydromorphie.

Lorsqu'il s'agit d'hydromorphie temporaire de surface, dans les horizons de surface, interviennent, pendant la période hivernale d'engorgement, une réduction et une mobilisation partielle du fer et du manganèse, suivie de leur précipitation localisée (sous forme de tâches rouilles ou de concrétions) par réoxydation, lorsque la nappe disparaît en été.

Dans le cas de l'hydromorphie profonde et permanente, le fer est principalement à l'état ferreux et s'accumule à la base du profil donnant aux horizons une teinte bleuâtre ou verdâtre. Les sols

hydromorphes sont qualifiés de REDOXISOLS (hydromorphie temporaire) ou de REDUCTISOLS (hydromorphie permanente).

Les sols hydromorphes jouent un rôle crucial dans la régulation hydrologique, la biodiversité et la séquestration de carbone. Ils abritent de nombreuses espèces végétales et animales adaptées à ces conditions. Ils sont considérés comme des marqueurs de la présence de zones humides dont le patrimoine écologique inestimable est menacé par le drainage agricole, l'urbanisation et le dérèglement climatique.

## 1.2. Sols et Propriétés édaphiques

Le sol est composé d'une phase solide (particules minérales et organiques), d'une phase liquide (la solution aqueuse contenant des substances et gaz dissous) et d'une phase gazeuse en interaction avec l'atmosphère mais à la teneur en CO<sub>2</sub> nettement plus élevée. La nature et la part respective des constituants minéraux et organiques déterminent les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols.

### 1.2.1. Les propriétés physiques : notion de texture et de structure

La texture est la retranscription qualitative de la répartition des particules élémentaires du sol (particules de diamètre inférieure à 2 mm) dans les classes de taille Argiles, Limons et Sables. Cette retranscription s'appuie sur des diagrammes de texture pour préciser la part respective de chacune de ses classes (diagramme de Jamagne, du GEPPA). On parlera alors de texture fine (argileuse), de texture équilibrée (limono-argilo-sableuse) ou de texture grossière (sableuse).

Elle influence (1) la rétention et la circulation de l'eau et des gaz dans le sol, (2) la mobilité, l'accumulation et le transfert des éléments minéraux ou des molécules qui circulent dans la solution du sol et (3) le comportement mécanique des sols (portance, structuration). Ainsi, dans un sol sableux (riche en quartz), les pores entre particules sont de taille relativement grande et l'eau n'y reste pas, ce qui favorise des conditions relativement sèches et bien aérée. Par ailleurs, les particules de quartz sont très peu propices à l'adsorption de cations et de composés organiques qui font de ces sols sableux des sols généralement pauvres en nutriments. Les sols riches en sables sont perméables et filtrants. C'est tout l'inverse pour les sols argileux principalement constitués d'argiles minéralogiques autrement appelés phyllosilicates.

La structure est le résultat de l'assemblage des particules limoneuses et sableuses sous l'influence des argiles et de l'humus associés en complexe argilo-humique (Girard, 2023). Il en résulte la formation d'agrégats dont la cohésion interne est assurée par les phyllosilicates, le fer, le calcium, les matières organiques et l'eau. Ces agrégats peuvent s'associer pour former des macro-agrégats puis à un niveau supérieur des mottes. Dans la partie supérieure du sol (épisolum), la structuration d'un sol est soumise à l'influence prépondérante de l'activité biologique qui va générer des agrégats stables et bien aérés (structures grumeleuse, grenue).

Dans les niveaux inférieurs du sol, les structures sont influencées par les variations d'humidité liées aux saisons climatiques à l'origine de variations de volume du sol. En période de dessèchement, le volume diminue, ce qui génère le développement d'un réseau fissural interne à l'origine de la formation d'une structure bien souvent polyédrique ou prismatique. La présence, la nature et la structuration des agrégats en unités plus importantes définissent également les conditions de perméabilité, d'aération du sol ainsi que les processus de minéralisation (azote, phosphore, carbone organique...) dont dépendent les organismes vivants du sol.

### 1.2.2. Les propriétés chimiques : notion de complexe argilo-humique, de capacité d'échange cationique, de bases échangeables, de taux de saturation et de pH

Le sol est caractérisé par la présence d'argiles minéralogiques et d'humus organisés sous la forme de complexes dominés par des anions (charges négatives) en interaction grâce à la présence de cations (charges positives) qui font assurer des ponts entre ces deux grands types de particules. Les cations, dont la plupart sont identifiés comme les nutriments du sol (calcium, potassium, sodium, magnésium), ne sont pas totalement solidaires du complexe argilo-humique. Ils peuvent s'en détacher pour rejoindre la solution aqueuse et nourrir de cette façon les organismes du sol (cations échangeables).

La capacité du complexe argilo-humique à fixer le plus grand nombre de cations remobilisable dans la solution aqueuse est appelée CEC (capacité d'échange cationique). Elle est très élevée pour les sols argileux et organiques et faible pour les sols sableux et principalement minéraux. Il s'agit d'un des indicateurs de la fertilité chimique potentielle.

Les cations échangeables impliqués dans la nutrition des organismes vivants du sol sont qualifiés de bases échangeables. Leur somme traduit la quantité de nutriments présente sur le complexe argilo-humique et disponible pour les organismes du sol. Plus elle est importante et plus le sol peut nourrir les différentes formes de vie qu'il contient. Le taux de saturation est le rapport entre la somme des bases échangeables et la capacité d'échange cationique. La fertilité chimique potentielle est optimale lorsque la CEC est élevée et que le taux de saturation atteint 100%.

Le pH exprime la concentration en ion hydrogène  $H^+$  dans la solution aqueuse du sol. Plus elle est élevée, plus le pH est acide. Ces ions  $H^+$  vont alors se fixer au complexe argilo-humique à la place des bases échangeables et appauvrir ainsi le sol en nutriments. Il en est de même avec les ions  $Al^{3+}$ . Lorsque le pH devient très acide ( $< 5.5$ ), l'aluminium soluble peut devenir très présent dans la solution aqueuse et entraîner un risque élevé de phytotoxicité. Dans ce cas,  $Al^{3+}$  devient le principal facteur limitant la croissance des cultures.

### 1.2.3. Les propriétés biologiques : notion d'aération, de transformation et de stockage

Le sol est une ressource naturelle vivante qui, à ce titre, constitue une part importante de la biomasse terrestre (200 kg à 4 tonnes de vers de terre par hectare) et de sa biodiversité composée de 100 000 à un million d'espèces de bactéries différentes par gramme de sol (Karimi *et al.*, 2018). Le sol est surtout peuplé de bactéries et d'actinomycètes, mais également de champignons, d'algues, de vertébrés (serpents, renards, lapins, taupes...) et d'invertébrés (fourmis, termites, mille-pattes, vers de terre...). Ces différentes communautés vont agir sur les autres composantes physiques et chimiques du sol par des actions d'aération, de transformation et de stockage (Jeffery *et al.*, 2010).

**Les micro-organismes regroupés autour des champignons et des bactéries vont recycler une partie des éléments nutritifs tels que l'azote ou le phosphore et les rendent disponibles pour les racines. Ils contrôlent aussi les échanges de gaz carbonique avec l'atmosphère et participent à la séquestration du carbone dans le sol.** Certains micro-organismes peuvent décontaminer un sol pollué, en particulier par des hydrocarbures, car ils ont la capacité de dégrader des polluants organiques.

Les vers de terre qui dominent la macrofaune du sol fragmentent et enfouissent la matière organique lors de leurs déplacements. Grâce au réseau de galeries qu'ils creusent, ils favorisent l'aération du sol, l'infiltration de l'eau et l'enracinement. Les turricules (déjections) de vers de terre sont le siège d'une importante minéralisation de la matière organique. **En modifiant l'agrégation et la porosité du sol, en décomposant la matière organique, ces organismes participent à l'infiltration et au stockage de l'eau dans les sols, au recyclage des nutriments, à la régulation du ruissellement de l'eau, au stockage du carbone.**

## 1.3. Fonctions et services écosystémiques

### 1.3.1. Les fonctions du sol

Grâce à ses propriétés physiques, chimiques et biologiques, le sol remplit de multiples fonctions pour l'environnement et la société. Il constitue non seulement la base de la production alimentaire et de la biodiversité, mais filtre et retient l'eau et stocke le carbone, ce qui contribue à la dépollution de l'eau, à la régulation du ruissellement, des risques d'inondation et aussi du climat. Il est communément admis que le sol assure les 7 grandes fonctions suivantes (Walter *et al.*, 2015) que l'on peut regrouper en 3 catégories :

- Fonctions biologiques (Habitat pour les organismes, Support physique stable pour le vivant, Stockage et fourniture de nutriments, Échanges gazeux avec l'atmosphère)
- Fonctions biogéochimiques (Filtration, rétention et dégradation des polluants, Stockage, recyclage et transformation de la matière organique)
- Fonctions hydrologiques (Stockage, circulation et infiltration de l'eau)

### 1.3.2. Les services rendus par les sols

Ces fonctions génèrent de nombreux services répondant à des besoins essentiels pour les populations humaines. Walter *et al.* (2015) regroupent ces services écosystémiques en quatre grandes catégories : les services d'approvisionnement, les services de régulation, les services culturels et les services d'auto-entretien.

Les services d'approvisionnement regroupent l'ensemble des productions issues des sols : production alimentaire pour les êtres humains et les animaux d'élevage, production de bois à vocation énergétique ou pour le bâtiment, production de fibre végétale pour le textile, production de matière première pour la construction, production biochimiques et pharmaceutiques.

Les services de régulation dérivent à la fois des caractéristiques propres des sols et de leur position particulière à l'interface des autres grands compartiments terrestres (biosphère, lithosphère, hydrosphère). Le sol joue un rôle essentiel de régulation, en quantité et en qualité, des transferts d'eau entre l'atmosphère, les nappes souterraines et les cours d'eau et il assure une fonction de réserve en eau pour les plantes et les organismes du sol. Les sols abritent ensuite une diversité considérable d'organismes vivants en interactions trophiques et physico-chimiques entre eux et avec les constituants organo-minéraux des sols. Cette biodiversité du sol joue un rôle essentiel dans la régulation des cycles du carbone et des nutriments, notamment l'azote.

Les services culturels liés aux sols ne sont pas à négliger tant leur rôle est important dans l'histoire des sociétés d'hier et d'aujourd'hui. Les modalités de valorisation des sols par l'homme à travers le temps ont contribué au façonnement et à l'évolution des paysages qui définissent le cadre de vie des populations. Le sol conserve également la mémoire et l'empreinte des passages de l'Homme et de ses activités. Il protège les ossements, les objets et les constructions passées et leurs analyses par les archéologues permettent de reconstituer les climats et les écosystèmes passés. L'importance du sol dans l'art et sa place dans les conceptions philosophiques et religieuses sont parties intégrantes des fondements culturels des civilisations.

Les services d'auto-entretien reposent sur des fonctions nécessaires pour la production des autres services qui agissent sur le cycle de l'eau, le cycle des nutriments, la production primaire et la formation des sols. Ces services d'auto-entretien mettent en jeu l'aptitude des sols à assurer, dans le temps et pour les générations futures, les services attendus par l'humanité. Cette aptitude dépend (1) des processus physiques, chimiques et biologiques engagés dans la formation des sols à partir d'un substrat et (2) de la résilience du sol à maintenir ou à recouvrir un fonctionnement générateur de

services malgré les pressions s'exerçant sur lui (contamination par des polluants, compaction de la structure, érosion...). Cette résilience est intimement liée aux interactions entre processus biologiques et physico-chimiques.

Les fonctions et les services écosystémiques rendus par les sols peuvent être synthétiser sous la forme de l'illustration présentée ci-dessous (cf. Fig.2).



Fig. 2 : Propriétés, fonctions et services écosystémiques (Adhikari K., Hartemink A. E., 2016, version française).

### 1.3.3. Évaluer les services écosystémiques par des indicateurs de fonctionnalité des sols.

L'évaluation des services écosystémiques des sols demeure un vœu pieux en raison de la difficulté liée au fait qu'un service mobilise plusieurs fonctions et processus, lesquels peuvent contribuer à plusieurs services. Il faut donc privilégier pour le moment l'évaluation de la fonctionnalité des sols dont on sait qu'elle est interconnectée aux services écosystémiques et qui peut être déterminée par les caractéristiques des propriétés des sols. Celle-ci dépasse le cadre de la capacité du sol à être utilisé par les activités humaines en prenant en compte ses limites. Il s'agit surtout de vérifier que cette ressource naturelle puisse être préservée pour les générations futures.

L'évaluation de la multifonctionnalité des sols apparaît donc comme une démarche incontournable pour rendre compte de l'état des sols, c'est-à-dire de « la capacité d'un certain type de sol à fonctionner, dans les limites d'un écosystème naturel ou anthropisé, pour favoriser la productivité des plantes et des animaux, pour maintenir ou augmenter la qualité de l'air et de l'eau, et pour améliorer la santé et l'habitat de l'homme » (Karlen *et al.*, 1997).

Cette démarche d'évaluation est d'autant plus pertinente qu'elle s'inscrit dans un contexte où les sols subissent des pressions qui fragilisent et menacent l'ensemble des écosystèmes terrestres auxquels nous appartenons (érosion, tassement, perte de matière organique, perte de biodiversité, salinisation, artificialisation...). Si le contexte réglementaire français depuis plus de 40 ans témoigne de la nécessité de protéger les sols, la loi Climat et Résilience de 2021 renforce les dispositifs précédents et change de paradigme en considérant les sols non plus comme une surface mais comme une ressource naturelle dont les fonctions doivent être préservées et restaurées.

## 2. Les sols et le contexte réglementaire depuis la loi Climat et Résilience

### 2.1. De la consommation d'espace (2D) à l'artificialisation (3D)

Depuis une vingtaine d'années, les pouvoirs publics ont mobilisé des outils réglementaires destinés à limiter les impacts défavorables de l'étalement urbain sur les milieux agricoles, naturels et forestiers. Les objectifs étaient tout d'abord qualitatifs en luttant contre (1) les émissions de polluants et de gaz à effet de serre, (2) les perturbations sonores et lumineuses subies par les espèces animales et les végétaux et (3) les îlots de chaleur modifiant le climat local.

Ils étaient également quantitatifs en visant une moindre consommation d'espace par l'urbanisation afin de limiter (1) la réduction des surfaces des espaces naturels propices à la biodiversité (fragmentation des biotopes, fragilisation des corridors écologiques) et (2) les surfaces imperméabilisées à l'origine notamment de la perturbation du cycle de l'eau (accentuation et accélération des phénomènes de ruissellement, d'inondation et de sécheresse, perte des zones humides et de leur rôle tampon).

Parmi ces outils réglementaires, on peut citer la loi SRU (2000) encourageant un équilibre entre préservation des ressources naturelles et urbanisation sous l'impulsion de nouvelles structures territoriales (SCoT, PLU (i), les lois Grenelle I et II (2009, 2010) favorisant un urbanisme économe en ressources foncières et préservant la biodiversité par l'obligation de réduire la consommation d'espaces agricoles et naturels et de restaurer les continuités écologiques (trames verte et bleue), les lois ALUR et LAAF (2014) tournées vers la protection des terres agricoles, naturelles et forestières en réduisant leur artificialisation, leur mitage et en densifiant les zones urbanisées ou bien encore la loi Biodiversité (2016) qui introduit le Zéro Perte Nette de biodiversité en 2018.

Si la loi Climat et Résilience du 22 août 2021 s'inscrit dans le prolongement des objectifs assignés par la loi Biodiversité concernant une consommation économe des espaces par les territoires, elle introduit un changement de paradigme puisque l'artificialisation issue de l'urbanisation n'est plus uniquement perçue comme le résultat d'un changement d'occupation du sol mais aussi comme une modification des fonctions biologiques, hydriques, climatiques et agronomiques des sols. De ce fait, depuis 2021, le sol n'est plus uniquement considéré comme un support de l'aménagement (vision 2D) mais comme une ressource naturelle qui assure également des fonctions sociétales fondamentales (vision 3D).

La prise en compte de ce nouveau paradigme s'inscrit dans une stratégie de planification à moyen terme puisque la loi Climat et Résilience impose, dans un premier temps, aux collectivités une réduction de la consommation des sols d'au moins 50% sur la période 2021-2030 comparativement à la consommation passée 2011-2020 puis une réduction de l'artificialisation des sols pour tendre en 2050 vers le zéro artificialisation nette. Avec cette loi, le législateur introduit un nouveau terme et une nouvelle réflexion sur l'usage des sols : désormais, il ne s'agit plus seulement de réduire la

consommation des espaces considérés par les territoires comme ENAF, mais bien de réduire toute artificialisation des sols (considérés ou non comme ENAF), traduite par l'altération durable de tout ou partie des fonctions du sol par son occupation ou son usage.

Après 2030, les collectivités devront atteindre le ZAN qui sera le solde de l'artificialisation et de la renaturation des sols. La renaturation est également un nouveau terme réglementaire introduit par la loi Climat et Résilience en réponse à l'artificialisation. Elle consiste en des actions de restauration ou d'amélioration de la fonctionnalité d'un sol, ayant pour effet de transformer un sol artificialisé en sol non artificialisé. La perte de fonctionnalité liée à l'artificialisation au sens de la cette loi devra être compensée par des opérations de génie écologique et pédologique qui restaureront ou réintroduiront des fonctions comparables. Or, pour y parvenir, les collectivités devront disposer de données sur la fonctionnalité des sols pour localiser ce potentiel puis l'utiliser.

## 2.2. Définir et mesurer la multifonctionnalité des sols : l'outil MUSE de l'ADEME

La production d'outils d'aide à la décision pour évaluer les fonctions des sols relève de travaux de recherche appliquée orientés vers les milieux agricoles et dédiés à des approches monofonctionnelles autour de la qualité agronomique des sols.

En 2017, un collectif associant le Cerema, l'Université Aix Marseille, la Chambre d'Agriculture de l'Indre, l'unité InfoSol de l'INRAE, le BRGM et l'IRSTV a proposé le projet MUSE « Intégrer la multifonctionnalité des sols dans l'élaboration des documents d'urbanisme » en partenariat avec les collectivités de Nantes Métropole, Châteauroux Métropole et la Métropole Aix-Marseille Provence. Porté par la suite par l'ADEME, le projet MUSE a bénéficié de l'évolution du contexte réglementaire (loi Climat et Résilience) pour apparaître comme un outil d'accompagnement du ZAN pour la prise en compte des sols dans l'aménagement (Branchu *et al.*, 2022).

A l'échelle des territoires intercommunaux, l'outil MUSE permet d'appréhender la multifonctionnalité des sols en zones non urbaines en évaluant et cartographiant quatre fonctions exercées par les sols (source de biomasse, régulation du cycle de l'eau, réservoir de carbone, réservoir de biodiversité du sol). Dans les zones urbaines, par manque d'information sur les sols, la caractérisation de ces fonctions n'est pas possible. Ce collectif a donc proposé une piste de réflexion pour contourner les difficultés liées au manque de données et aux difficultés d'investigation de terrain, en s'appuyant sur le concept de « pleine terre » qui définit la capacité optimale d'un sol à exercer tout ou partie des fonctions associées à un sol naturel en contexte de sol profond.

Ce contexte de « pleine terre » ne peut être appliqué pour les sols associés aux milieux naturels pionniers comme les milieux calcicoles et silicicoles où ce concept ne reflète pas la réalité de la fonctionnalité des sols. Quand bien même il n'est pas ou peu épais, cela ne signifie pas qu'il n'est pas fonctionnel. C'est sa structure et son origine qui fixent ses fonctions. La notion de « pleine terre » peut être alors corrélée à la hauteur de la végétation, à savoir que plus un sol est épais, plus la végétation arborée est dominante (et vice versa). En associant ce concept et cette correspondance, le collectif propose d'estimer non pas la fonctionnalité du sol mas sa capacité à exercer les fonctions d'un sol naturel.

L'approche MUSE permet ainsi de construire une représentation cartographique de la multifonctionnalité des sols au regard des données disponibles sur le territoire. C'est cette disponibilité des données qui devient prépondérante dans la démarche pour estimer la multifonctionnalité à une échelle de planification satisfaisante, comme pour le SCoT. Il convient de s'assurer de l'adéquation entre chacune de ces échelles et le niveau de précision spatiale des données

Sol utilisées. Si des données Sol au 1/250 000 suffiront pour une vision régionale (SRADDET), une précision plus importante doit être exigée pour accompagner la création ou la révision de documents d'urbanisme communaux ou supra-communaux (1/10 000 à 1/50 000 a minima).

### 2.3. La place des sols dans les documents d'urbanisme de la Métropole Rouen Normandie

La Métropole Rouen Normandie est constituée de 71 communes (cf. Fig.3). Son territoire s'étend sur 5 boucles de la Seine sur 664 km<sup>2</sup> et concentre 498 822 habitants et de nombreux enjeux économiques, écologiques et sociaux (cf. Fig.4). Le territoire de la Métropole est composé d'environ 18 000 ha de surfaces agricoles et 3 000 ha d'espaces naturels, auxquels s'ajoutent 25 000 ha de surfaces forestières.



## La Métropole Rouen Normandie



Fig. 3 : la Métropole Rouen Normandie en 71 communes (source : MRN).



Fig. 4 : Tableau de bord démographique, économique, social et écologique de la Métropole Rouen Normandie (source : MRN).

Ce territoire, inséré entre Paris et Le Havre dans l'axe Seine, cumule de nombreuses problématiques que ce soit la gestion des risques naturels et technologiques face au développement du territoire, le maintien de l'agriculture face à une pression foncière croissante, la préservation de la biodiversité face à l'étalement de l'urbanisation et au développement économique, cumulés aux effets amplificateurs du changement climatique.

La Métropole s'est saisie de ces enjeux pour apporter des réponses stratégiques et opérationnelles dans ces différentes politiques publiques pour permettre une transformation progressive du territoire et assurer ainsi sa résilience.

Différents documents stratégiques règlementaires portent les ambitions métropolitaines :

- Le schéma de cohérence territorial (SCOT) approuvé en 2015
- Le plan local d'urbanisme intercommunal (PLUi) approuvé en 2020
- Le plan climat air énergie territorial (PCAET) approuvé en 2019
- Le plan local de l'habitat (PLH) approuvé en 2019
- Le plan de déplacement urbain (PDU) approuvé en 2014 en cours de révision
- Le plan de prévention du bruit dans l'environnement (PBBE) approuvé en 2010 en cours de révision

Mais également de façon volontariste par :

- La charte biodiversité
- La Charte forestière de territoire
- Le Projet Alimentaire Territorial (PAT)

Ces différents documents inscrivent la Métropole comme une collectivité volontaire dans la transition sociale écologique. Le Conseil métropolitain a depuis déclaré l'état d'urgence climatique sur son territoire. En réponse, la Métropole se fixe l'ambition d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050, s'engage à placer les enjeux climatiques au cœur des décisions politiques et à éclairer le projet de territoire au regard de cet objectif de transition sociale-écologique.

Les ordonnances de la Loi ELAN relative à la modernisation des SCOT élargissent et refondent leur contenu en y intégrant un objectif clair de prise en compte des transitions écologique, énergétique et climatique. C'est dans ce cadre que l'exécutif métropolitain fait le choix d'engager l'élaboration d'un SCOT valant PCAET (SCOT-AEC). Cette fusion de ces plans montre la volonté de la Métropole d'ancrer plus fortement son engagement dans l'atténuation et l'adaptation aux effets du changement climatique afin d'obtenir un document de planification ciblant les nouvelles ambitions métropolitaines et identifiant les marges de progression à atteindre pour un territoire résilient en 2050.

En concomitance est parue la Loi Climat Résilience qui en matière de planification introduit deux notions majeures :

- l'objectif de réduction par deux de la consommation foncière du territoire sur les 10 années suivant la parution de la Loi par rapport à la période de référence 2011-2021.
- le Zéro Artificialisation Nette à l'horizon 2050 de façon progressive par tranches de 10 années (2031-2040 et 2040-2050).

Ces deux objectifs offrent l'opportunité de concevoir de manière différente le développement du territoire et d'imaginer un aménagement plus durable et soutenable. Pour cela, la politique foncière et la planification urbaine de la Métropole doivent se renouveler et se fonder sur la caractérisation des sols du territoire, non plus dans une seule vision 2D et sur la seule occupation du foncier, mais aussi sur la nature et la fonctionnalité des sols pour pouvoir organiser les activités humaines tout en respectant les grands équilibres naturels et les fonctionnalités écologiques du territoire.

Dans ce cadre, la Métropole a souhaité connaître la nature et la valeur de ses sols et se doter d'un outil d'aide à la décision pour orienter la planification urbaine. Les directions de l'agriculture, de la planification urbaine, de l'action et la stratégie foncière et de l'environnement portent collectivement ce projet dédié à la connaissance des sols et de leurs fonctionnalités. Elles sont appuyées par l'ensemble des autres directions dans le cadre du groupe de travail ZAN créé au sein de la métropole.

### 2.3.1. Objectifs et Cahier des Clauses Particulières (CCP) entre MRN et VigiSol

La Métropole Rouen Normandie a missionné VigiSol pour produire une banque de données sur les sols de son territoire (les zones NB et NA du PLU en ont été exclues car déjà protégés dans le PLUi). Cette étude repose sur les objectifs suivants :

- Créer un Référentiel pédologique d'échelle fine (1/10 000 au 1/50 000 sur la MRN)
- Caractériser les différents types de sol suivant leur potentialité agronomique, leur prédisposition comme Sol de Zone Humide (SZH) et leur sensibilité à l'érosion hydrique
- Estimer la multifonctionnalité des sols
- Evaluer les conditions de transposition de l'étude en milieu urbain (zones UP et URP)

Ces objectifs sont articulés autour de 2 missions :

- Mission 1 : caractériser les sols et leurs fonctions en milieu rural et péri-urbain
- Mission 2 : définir les conditions de faisabilité de prospections pédologiques en milieu urbain

Ces objectifs ont été déclinés de la manière suivante :

- Produire une base de données Sol à caractère opérationnel dans les zones A, N et AU reposant sur des observations de terrain (sondages, fosses) et des analyses en laboratoire,
- Cartographier la pédogenèse et les propriétés physico-chimiques des sols (humification, oxydo-réduction, épaisseur, texture, charge en cailloux, granulométrie, pH, MO, C/N, CEC...),
- Modéliser le potentiel agronomique des sols selon différents systèmes de production (conventionnel productions végétales, élevage, maraichage) selon le modèle SQUAT développé par P. Le Gouée (2017),
- Circonscrire les sols répondant potentiellement aux critères Sols de zones humides selon l'arrêté 2008 modifié en 2009 (MEDDE, 2013),
- Spatialiser les niveaux d'intensité de l'aléa érosion hydrique des sols en zone A et N selon le modèle SCALES développé par P. Le Gouée (2010 et 2011),
- Cartographier la multifonctionnalité des sols à partir de l'outil MUSE sur les zones A, N et AU (Branchu *et al.*, 2022),
- Évaluer les conditions de réalisation d'une étude de sol en milieu urbain à partir de sondages pédologiques de reconnaissance (11 sites tests UP/URP sélectionnés par la MRN) et engager une réflexion sur la capacité des sols urbains à exercer les fonctions d'un sol naturel par l'approche MUSE.

### 2.3.2. Durée de l'étude

Le planning de réalisation des missions 1 et 2 de l'étude des sols a été programmé entre février 2023 et avril 2024. La frise ci-dessous (cf. Fig.5) en détaille le déroulé. En raison de contraintes de terrain (accès aux parcelles, demandes DT/DICT...), la campagne de sondages a été prolongée afin de couvrir la totalité du périmètre à investiguer. L'étude a donc été conduite sur 14 mois.

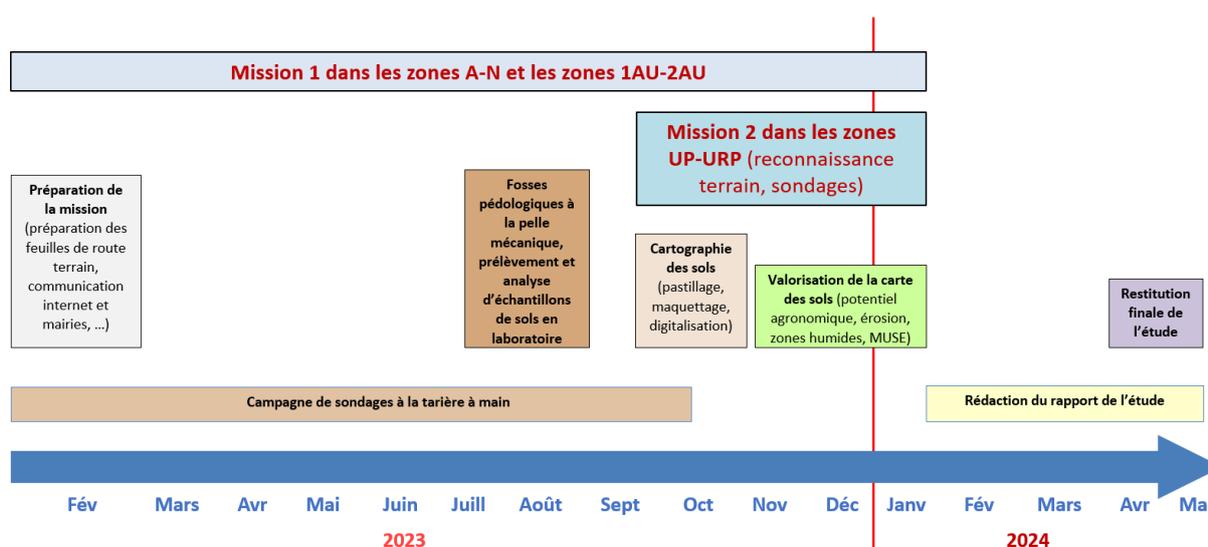


Fig. 5 : Planning de réalisation de l'étude.

# Méthodologies déployées

# 1. La production des données Sol sur le territoire de MRN

Avant que la Métropole Rouen Normandie n'engage un programme d'étude des sols sur son territoire, les données disponibles relevaient du programme Référentiel Régional Pédologique (RRP) et du programme Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (RMQS), tous deux issus du programme national Inventaire, Gestion et Conservation des Sols (IGCS) porté par le GisSol.

Le RRP est une base de données régionale ou départementale sur les sols. Il représente une synthèse actualisable des connaissances sur la répartition et la nature des grands types de sols d'une région ou d'un département. Il a pour objectif de déterminer et de localiser les caractéristiques principales des sols et du milieu en vue de leur gestion et de leur conservation. Sa précision spatiale correspond à celle d'une représentation cartographique à l'échelle 1/250 000. Les espaces agricoles, naturels et forestiers de la MRN disposent des données Sol du programme RRP Haute-Normandie porté par le Conservatoire d'Espaces Naturels Normandie et finalisé en 2018. Cependant, l'échelle de représentation spatiale des sols ne permet pas de répondre aux enjeux du territoire au niveau local.

Le RMQS est un programme d'observation et de suivi sur le long terme de la qualité des sols. Il s'appuie sur une sélection de 2240 sites échantillonnés tous les 15 ans. Ces sites sont répartis uniformément sur le territoire français selon une maille carrée de 16 km de côté. Des prélèvements d'échantillons de sols, des mesures et des observations sont alors effectués au centre de chaque maille. L'évaluation et le suivi de la qualité des sols sont fondés sur l'analyse de propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols, associée à la recherche des sources de contamination diffuse et à la connaissance de l'historique de l'occupation et des pratiques de gestion de chaque site. Chaque site RMQS dispose de connaissances très fines sur le sol en place mais qu'il n'est pas possible d'interpoler spatialement à grande échelle en raison des caractéristiques du maillage retenu.

Toutefois, les informations issues du RRP Haute-Normandie et du RMQS Normandie ont été consultées afin de disposer sur le territoire de la MRN de données de cadrage sur les grands types de sol et leurs caractéristiques physiographiques. Cette démarche a constitué une étape préparatoire à la construction d'un programme d'acquisition de données ponctuelles sur les sols à l'échelle du 1/50 000 dans les zones A et N (hors forêt) et du 1/10 000 pour les zones AU dans la perspective de produire des représentations cartographiques des sols et de leurs propriétés nécessaires à l'évaluation de leurs fonctionnalités. Les zones NB et NA du PLU n'ont pas été retenues dans ce programme car elles sont déjà protégées dans le PLUi.

## 1.1. L'acquisition des données ponctuelles : sondages et fosses pédologiques

La représentation cartographique des sols s'appuie sur la production de connaissances issues de campagnes de terrain permettant de décrire les sols à partir de sondages à la tarière à main et/ou de fosses pédologiques. La difficulté fondamentale en matière de cartographie des sols tient à l'acquisition de connaissances ponctuelles suffisantes pour expliquer, à l'échelle locale, les logiques d'organisation spatiale des sols sur la base de sondages et fosses ponctuels dont la superficie prospectée est comprise entre quelques dizaines de cm<sup>2</sup> pour les sondages tarière à 2m<sup>2</sup> maximum pour les fosses.

Il en résulte qu'il est essentiel d'analyser les liens qui existent entre les caractères intrinsèques des sols et leur distribution dans le paysage à trois dimensions. La genèse des sols étant sous contrôle de 6 facteurs que sont la géologie, le climat, l'activité biologique, la topographie, l'homme et le temps,

l'étude de la disposition des sols dans l'espace suppose d'établir de la meilleure des façons les lois et mécanismes de la pédogenèse dans un environnement qu'il convient de cerner avec précision. Par ailleurs, la connaissance préalable des liens entre sol et environnement ne peut conduire à entreprendre une démarche purement déductive car nous ne sommes pas dans le domaine des sciences exactes. Dans la mesure où il n'est pas possible d'intégrer, dans l'analyse des relations entre les sols et les 6 facteurs de la pédogenèse, l'ensemble des caractères de l'environnement déterminant les modalités de constitution des sols, on ne peut pas prédire correctement la nature du sol et sa variabilité dans l'espace. C'est la raison pour laquelle, il convient en tous lieux de procéder à de nombreuses vérifications.

La qualité du rendu cartographique dépendra de la densité des observations et de la méthode utilisée pour choisir la localisation des points de sondage. La densité de sondages est fonction de l'échelle spatiale retenue en vue de la cartographie. Pour une cartographie des sols au 1/10 000, il sera nécessaire d'effectuer un sondage pour 1 à 3 ha. Au 1/50 000, 1 sondage pour 30-40 ha sera suffisant. Au 1/250 000e, on retiendra 1 sondage pour 400 ha (Legros, 1996).

### 1.1.1. Le positionnement des sites d'échantillonnage à la tarière

La localisation des points de sondage est un élément aussi important que la densité de sondages en vue de la cartographie finale. Plusieurs méthodes de positionnement existent. La première consiste à choisir des sites d'observation, un par un, en profitant dans chaque cas, de l'expérience acquise jusque-là (démarche du type « pas à pas »). Ainsi le choix d'un site résulte-t-il souvent de ce que le précédent a permis d'apprendre, ce qui conduit à proposer une cartographie dite raisonnée, reposant sur la construction d'un raisonnement logique relatif à la distribution spatiale des sols et utilisant un nombre limité d'observations.

Une deuxième méthode propose une prospection exhaustive en tous points de l'espace. Il s'agit de définir au départ des sites selon un procédé d'échantillonnage systématique qui fixe le nombre et le positionnement des sites d'observation selon un découpage de l'espace par grille (méthode des secteurs).

La troisième méthode est liée à l'emploi de la géostatistique qui consiste à observer le sol localement et à mettre en œuvre des moyens statistiques pour interpoler et généraliser à toute la surface ces observations. Le positionnement préalable des sites est obtenu par un système adapté de tirage aléatoire.

Enfin, nous pouvons mentionner la méthode des transects qui s'appuie sur une subdivision du territoire en entités traversées par des coupes le long desquelles sont positionnés des sites d'observation. Le nombre et la localisation des transects dépendent de la complexité des environnements des entités. Il en est de même à propos du nombre et du positionnement des points de sondage par transect. La méthode que nous avons retenue associe la méthode des secteurs et la méthode par transect.

### Premier critère de positionnement des points de sondage

Il renvoie à la nécessité d'observer les sols à partir de la prise en compte de toutes les caractéristiques physiographiques du milieu et suppose une analyse approfondie du contexte géologique, géomorphologique, topographique et des différents types d'occupation du sol.

Les données géologiques sont obtenues à partir des cartes du BRGM au 1/50 000. Les informations disponibles relèvent du zonage, de l'âge et de la nature des roches. Les cartes géologiques font état également de la nature et de la localisation des formations superficielles. Il s'agit de formations

généralement meubles qui ont une origine autochtone (formations d'altération des roches en place) ou allochtone (déconnexion de la formation avec le substrat local). Sur ces cartes géologiques, la présence des formations superficielles est généralement sous-estimée, et ce, pour deux raisons. Premièrement, par convention, ces formations ne sont cartographiées que lorsque leur épaisseur dépasse 50 cm. Par ailleurs, les formations superficielles ont tendance à masquer des données plus importantes aux yeux du géologue, comme celles qui expriment les structures. C'est la raison pour laquelle la représentation spatiale des formations superficielles est régulièrement minimisée. Aussi, la reconnaissance personnelle de terrain du contexte géologique s'avère-t-elle essentielle pour compléter l'analyse géologique.

L'étude du contexte géomorphologiques s'appuie pour partie sur les cartes géologiques mais surtout sur l'abondante littérature et travaux scientifiques dans le domaine concernant la région. La connaissance des processus de mise en place des modelés à l'échelle des temps géologiques et celle des nombreux témoignages encore présents dans la topographie actuelle sont des aides très précieuses pour comprendre les modalités d'organisation globale des sols.

Le contexte topographique peut être appréhendé de différentes manières. La pratique régulière de la lecture de cartes topographiques conduit à développer une capacité d'analyse rapide et fine des formes et des éléments de relief. A ce titre, les cartes topographiques au 1/25 000 permettent d'optimiser cette lecture. Pour compléter nos interprétations, nous avons eu recours également à des données émanant de traitements informatiques du Modèle Numérique de Terrain maillé au pas de 25 m. Ces données concernent les valeurs de pente, les expressions morphologiques de concavité et convexité des versants en sections transversales et longitudinales, les conditions de site par l'identification des interfluves, des hauts, milieux et bas de versants et des fonds de vallée. Elles concernent enfin les conditions d'exposition des versants. La prise en compte du relief est très importante car les différents facteurs topographiques qui viennent d'être présentés ont un rôle fondamental dans la réception et l'orientation des flux d'énergie (chaleur) et de matière (eau), flux dont on sait qu'ils contrôlent la pédogenèse.

Les modalités d'occupation des sols impactent directement la formation des sols et leur évolution. Certaines cultures ou zones urbanisées peuvent favoriser l'érosion des sols, tandis que le drainage agricole ou la construction de structures imperméables sont susceptibles de modifier le régime d'humidité du sol. Cela peut affecter la nature des réactions chimiques et biologiques dans le sol, ainsi que la distribution des minéraux et des éléments nutritifs. Les traitements et usages agricoles des parcelles peuvent influencer l'état structural et la composition chimique du sol et agir indirectement sur la présence et la diversité des communautés microbiennes et végétales. Or ces organismes jouent un rôle crucial dans les processus de pédogenèse, tels que la décomposition de la matière organique et la fixation d'azote. Les orthophotoplans, le MOS de la MRN et les données du Registre Parcellaire Graphique permettent d'appréhender le lien entre types de sol et usages anthropiques. Ces données ont été utilisées également.

## Second critère de positionnement des points de sondage

Il est associé à la mobilité et la sécurité des personnes assurant les relevés de terrain. Compte-tenu du temps imparti pour mener cette étude et de l'ampleur du travail à accomplir pour sonder les sols, l'objectif a été de limiter au maximum les pertes de temps en déplacement entre la voiture et le lieu de sondage et entre les points de sondage. Par ailleurs, les axes les plus empruntés ont été écartés afin de limiter l'exposition des personnes de terrain aux dangers inhérents à la circulation des véhicules.

Dans les zones A et N, l'investigation des sites d'échantillonnage a été engagée après avoir informé les communes de notre passage. Dans les zones AU, les sondages ont été effectués après accord préalable des exploitants ou des propriétaires.

### 1.1.2. Modalités de caractérisation des sols

Le sol atteste d'une grande variabilité dans ses trois dimensions. La carte va donc représenter la réalité de manière simplifiée. Cette schématisation est la traduction graphique de la façon dont le pédologue cartographe appréhende le sol sur le terrain. Différents modèles de représentation peuvent être envisagés parmi lesquels nous avons retenu le modèle « profil » et le modèle « horizon/volume pédologique ».

Le modèle « profil » renvoie à une démarche d'observation verticale d'un sol. Il révèle que le manteau d'altération pédologique est organisé en strates communément appelées horizons. Ces strates ne sont pas disposées de manière quelconque mais interviennent toujours dans le même ordre. Leur succession constitue un profil caractéristique identifiant complètement le type de sol. Cette organisation en horizons, ordonnés et parallèles à la surface, est typique des zones relativement planes. La répétition des observations du sol par profil montre qu'il existe des profils types. Dans ces conditions, une première méthode de caractérisation des sols consiste à délimiter les portions de surface à l'intérieur desquelles le profil de sol reste identique à lui-même.

Le modèle « horizon/volume pédologique » traduit l'idée que sur les pentes, les horizons sont souvent très variables et subissent latéralement et à courte distance des modifications importantes de nature et d'épaisseur. Il est possible de s'en tenir à la méthode des profils, c'est-à-dire définir des surfaces dans lesquelles le profil ne subit pas de variation sensible. Cependant cette approche conduit à multiplier ces profils de référence et à définir des aires d'application de dimension très réduite. Alors le modèle profil apparaît inadapté. L'objet dont il faut trouver l'extension latérale ne peut plus être le profil, c'est l'horizon au sens large du terme. Cet horizon n'est pas nécessairement horizontal, c'est une couche parfois même un simple volume pédologique de forme quelconque. La complexité des situations rencontrées ne permet pas une représentation aisée en plan du manteau pédologique. Par conséquent, la notion de profil demeure comme un élément objectif d'observation du sol suivant une verticale en un lieu donné.

Compte tenu de l'hétérogénéité des contextes géologiques, géomorphologiques, topographiques et anthropiques identifiés sur le territoire de la MRN, il est indispensable de prendre en compte dans l'identification des profils la notion de chaînes de sols. En effet, les connaissances préalables que nous avons des sols témoignent du fait que les sols sont fréquemment organisés le long des versants et dans un ordre strict. La différenciation latérale est due à un certain nombre de facteurs parmi lesquels on peut citer l'érosion (sol tronqué en haut de versant et colluvionné en bas) et la dynamique latérale de l'eau (sol sec en haut et humide en bas). De cette façon, la détermination des profils prend en compte les modifications importantes de nature et d'épaisseur des horizons. La représentation cartographique illustre, en ce sens, les types de sol dont les horizons témoignent de l'absence ou de la présence de modifications en relation avec les dynamiques latérales à l'origine des chaînes de sols.

### 1.1.3. Les variables descriptives des sols à partir des sondages tarière

La qualité de la cartographie repose sur la qualité des observations faites sur le terrain. Ces descriptions sont entreprises à partir de fiches de relevés. Il existe un grand nombre de modèles de fiches qui renvoient très souvent aux mêmes variables descriptives. Le modèle de fiche que nous avons utilisé (cf. Fig.6) fait référence aux variables suivantes :

N° sondage	N° Etude	Date	Auteurs	érosion
Commune		Végétation		Matériau parental
Humus (sous forêt)		Pente (%)	Orientation pente	GPS (WGS84)
EG en surface		Cause arrêt		Prof arrêt (cm)
morphologie				
<b>Profondeurs</b> en cm	<b>Texture</b>	<b>Effervescence</b>	<b>Humidité</b>	<b>Couleur</b>
1	1	<b>Intensité</b>	1	<b>Horizon (Munsell)</b>
2	2	1	2	1
3	3	2	3	2
4	4	3	4	3
5	5	4	5	4
6	6	5	6	5
↑	↓	1	1	1
Min	Max	2	2	2
		3	3	3
		4	4	4
		5	5	5
		6	6	6
		7	7	7
		8	8	8
		9	9	9
		10	10	10
		11	11	11
		12	12	12
		13	13	13
		14	14	14
		15	15	15
		16	16	16
		17	17	17
		18	18	18
		19	19	19
		20	20	20
		21	21	21
		22	22	22
		23	23	23
		24	24	24
		25	25	25
		26	26	26
		27	27	27
		28	28	28
		29	29	29
		30	30	30
		31	31	31
		32	32	32
		33	33	33
		34	34	34
		35	35	35
		36	36	36
		37	37	37
		38	38	38
		39	39	39
		40	40	40
		41	41	41
		42	42	42
		43	43	43
		44	44	44
		45	45	45
		46	46	46
		47	47	47
		48	48	48
		49	49	49
		50	50	50
		51	51	51
		52	52	52
		53	53	53
		54	54	54
		55	55	55
		56	56	56
		57	57	57
		58	58	58
		59	59	59
		60	60	60
		61	61	61
		62	62	62
		63	63	63
		64	64	64
		65	65	65
		66	66	66
		67	67	67
		68	68	68
		69	69	69
		70	70	70
		71	71	71
		72	72	72
		73	73	73
		74	74	74
		75	75	75
		76	76	76
		77	77	77
		78	78	78
		79	79	79
		80	80	80
		81	81	81
		82	82	82
		83	83	83
		84	84	84
		85	85	85
		86	86	86
		87	87	87
		88	88	88
		89	89	89
		90	90	90
		91	91	91
		92	92	92
		93	93	93
		94	94	94
		95	95	95
		96	96	96
		97	97	97
		98	98	98
		99	99	99
		100	100	100
		101	101	101
		102	102	102
		103	103	103
		104	104	104
		105	105	105
		106	106	106
		107	107	107
		108	108	108
		109	109	109
		110	110	110
		111	111	111
		112	112	112
		113	113	113
		114	114	114
		115	115	115
		116	116	116
		117	117	117
		118	118	118
		119	119	119
		120	120	120

Fig. 6 : Fiches de relevés STIPA 2000 (source : INRA).

### Considérations générales

Rappelons tout d'abord que le positionnement des sondages sur le terrain a été effectué avec le souci de respecter au mieux la localisation des points d'observation tels qu'ils ont été déterminés initialement. Au voisinage des points de sondage, les précautions d'usage ont été appliquées à propos des sources potentielles de perturbation des profils (Pansu, 1998). Les bordures de routes et de champs et les zones proches des haies et des talus ont été écartées. De manière analogue, une topographie non représentative du lieu à sonder, révélant par exemple une cuvette, une rupture de pente ou un replat, n'a pas été retenue. Enfin, lorsque nous étions en présence de sols à forte charge en éléments grossiers pour lesquels il était difficile de sonder l'ensemble de leur épaisseur, nous nous sommes attachés à renouveler sur ces sites deux fois les projections à la tarière.

### Description des profils et horizons.

La description des profils et horizons de sol a été menée au moyen de tarières à main de type Edelman. De cette manière la description des sondages apparaît simplifiée par rapport aux descriptions des fosses pédologiques et correspond à une double nécessité : d'une part, il n'est pas possible de consacrer à un sondage plus de quelques minutes ; d'autre part, l'utilisation de la tarière provoque une désorganisation partielle du matériel rendant difficile ou impossible l'observation de certains caractères (structure par exemple).

Sur place, les prélèvements de sol ont été posés à la surface en respectant leur positionnement à l'intérieur de la couverture pédologique. La reconstitution des profils de sol ainsi réalisée a permis d'identifier les horizons de référence (profondeur, type) et les principaux caractères à observer. Ceux-ci concernent l'épaisseur, les couleurs, les taches d'hydromorphie, les éléments grossiers, les textures, la présence de calcaire (test à l'acide chlorhydrique) et de fer ferreux (test à la phénanthroline).

### Description des caractères principaux

Le premier objectif est de définir la profondeur totale du sol. L'observateur peut être amené à rencontrer trois situations. La situation la plus confortable se traduit par la présence d'une transition brutale entre la base du sol et le substrat. Dans ce cas de figure, l'épaisseur du sol est bien identifiée. La situation suivante correspond à une transition très progressive entre la couverture pédologique et la roche sous-jacente en raison d'un niveau élevé d'altération du substrat. Il est alors très difficile de savoir ce qui relève de la racine du sol et de l'altérite de la roche. Enfin, la dernière situation renvoie à des couvertures pédologiques dont l'épaisseur est supérieure à l'épaisseur maximale qui peut être prospectée par la tarière, soit 120 cm.

Le second objectif vise la définition des profondeurs d'apparition et de disparition de chaque horizon. La distinction des horizons nécessite une inspection rapide et provisoire du profil reconstitué à la surface du sol en observant les couleurs, les textures, les éléments grossiers, les signes d'hydromorphie et les réactions à l'acide chlorhydrique ou la phénanthroline. Il est essentiel de délimiter les zones de passage d'un horizon à un autre pour mesurer leur épaisseur.

### La couleur

La couleur est un caractère très important et très significatif lors de la description des profils de sol (Escadafal, 1988). Elle est immédiatement perceptible et guide le pédologue pour distinguer les différents horizons avant la description systématique horizon par horizon. Pour décrire la couleur des sols, un référentiel est communément utilisé en France et dans le monde : le Code Munsell. Ce code universel renvoie à des planches de couleur qui font référence à des teintes de base (hue) et des nuances de clarté (value) et de pureté (chroma).

La couleur permet d'observer la filiation d'un sol avec une roche-mère (sols lithochromes) ou de révéler la présence de constituants qui se sont individualisés, accumulés ou concentrés au cours de la pédogenèse. Le fer est le colorant principal des sols. Cette coloration recouvre toute la gamme des bruns, brun-jaune, ocre-jaune, orangés et rouges lorsque le fer est à l'état oxydé et la gamme des gris-bleu/gris-verdâtre lorsqu'il est à l'état réduit par excès d'eau quasi-permanent dans les sols. Les matières organiques colorent également les horizons en gris ou en noir. L'absence de colorants est une information toute aussi importante car elle traduit généralement un appauvrissement en fer ou matière organique par pédogenèse.

### La texture

La texture renseigne sur la répartition des particules élémentaires minérales du sol (taille inférieure à 2000  $\mu\text{m}$ ) au sein des fractions argileuses (taille des particules inférieure à 2  $\mu\text{m}$ ), limoneuses (taille comprise entre 2 et 50  $\mu\text{m}$ ) et sableuses (taille comprise entre 50 et 2000  $\mu\text{m}$ ). Cette variable est très importante à évaluer car de nombreuses propriétés du sol en dépendent comme le comportement mécanique, la capacité d'échange cationique ou la conductivité hydraulique à saturation des sols (Baize, 2011). La texture d'un sol s'apprécie au moyen d'un diagramme triangulaire combinant les proportions des fractions argiles, limons et sables de telle manière que la somme des valeurs des trois fractions soit égale à 100%.

La texture peut être analysée en laboratoire ou sur le terrain. Le relevé de terrain a été retenu pour l'étude. C'est cette caractéristique qui est déterminée lors des sondages. La texture-terrain s'apprécie à partir d'un échantillon de sol que l'on malaxe entre le pouce et l'index.

L'appréciation de la texture repose sur la reconnaissance au toucher des particules sableuses, limoneuses et argileuses. Le sable se reconnaît par sa granulométrie. Il se sent parfaitement sous les doigts en laminant un peu la terre. Les limons, à l'état humide, glissent sous les doigts sans manifester de résistance. La consistance est celle d'une pâte non collante (toucher savonneux). A l'état sec, le

limon se comporte un peu comme du talc. Les argiles donnent à l'échantillon sa plasticité et son adhésivité. En roulant les argiles entre les doigts, on arrive à former un ruban long et fin. C'est la synthèse de ces différents touchers qui amène le pédologue à proposer une texture.

### Les éléments grossiers

Les éléments grossiers correspondent à des éléments minéraux solides dont la taille est supérieure à 2 mm. Entre 2 mm et 2 cm, on parle de graviers, entre 2 et 7,5 cm de cailloux, entre 7,5 et 25 cm de pierres et au-dessus de 25 cm, on fait référence aux blocs. Dans une description des sols, il est nécessaire de préciser l'abondance, la taille et la nature des éléments grossiers (Gras, 2006). L'abondance est difficile à estimer sur le terrain. Pour l'horizon de surface, on s'appuie sur une appréciation visuelle au moyen de la Charte de Folk qui permet d'exprimer l'abondance par un pourcentage surfacique. Pour les horizons profonds, l'abondance est obtenue à partir des prélèvements à la tarière. Dans ce cas, la qualité de l'estimation dépend de la taille des éléments grossiers. Elle sera satisfaisante en présence de graviers, moyenne en présence de cailloux et très faible si les éléments grossiers correspondent à des pierres. L'abondance est utilisée pour exprimer la proximité de la roche-mère par rapport à la surface.

Elle intervient également dans la dénomination du sol lorsqu'elle traduit une charge en éléments grossiers très importante (supérieure à 60%). Elle est utile aussi pour estimer correctement la réserve utile d'un sol. Ainsi, la capacité de stockage en eau utile pour les végétaux d'une couverture pédologique comprenant en volume 50% d'éléments grossiers sera-t-elle égale à celle d'un sol dépourvu d'éléments grossiers deux fois moins profond. Elle témoigne de bonnes conditions d'infiltration des eaux pluviales et d'une bonne aptitude du sol à s'opposer à l'érosion hydrique. La taille et la nature sont des indicateurs qui permettent d'établir la présence ou non de filiation entre le sol et le substrat sous-jacent. Ils renseignent également sur le processus de colluvionnement lorsque les roches ou formations superficielles des hauts de versant se retrouvent sous forme d'éléments grossiers dans les parties basales.

### L'hydromorphie

L'hydromorphie exprime le développement de processus d'oxydo-réduction du fer et du manganèse sous l'effet d'un engorgement en eau du sol (BAIZE, 2009). L'intensité de l'hydromorphie s'accroît avec l'allongement de la durée de l'engorgement. Cet excès d'eau dans le sol est dû à une faible perméabilité du sol ou du substrat et à un drainage nul ou insuffisant (topographie de cuvette, de replat, de fond de vallée). La saturation se manifeste principalement sous la forme d'une nappe perchée ou profonde qui va affecter tout ou partie du sol. Lorsque l'hydromorphie est temporaire, le fer se présente dans les horizons sous un état oxydé : on parle d'horizons rédoxiques. En cas de saturation prolongée ou pérenne, le fer apparaît sous un état réduit : on parle d'horizons réductiques.

L'intensité, la nature et la proximité de l'hydromorphie par rapport à la surface sont des données indispensables pour nommer correctement les sols hydromorphes et pour estimer l'importance de l'engorgement. Cependant, la généralisation du drainage agricole dans les sols « humides » conduit régulièrement à diagnostiquer l'existence passée de processus d'hydromorphie. Ces informations sont recueillies lors des prélèvements à la tarière. Lorsque l'hydromorphie s'exprime par des taches, on note alors leur pourcentage et leur origine dans l'horizon. Le pourcentage est apprécié au moyen de la Charte de Folk présentée précédemment à propos des éléments grossiers. L'origine est obtenue à partir de la couleur des taches : couleur rouille = oxydation du fer, couleur beige = départ du fer, couleur noirâtre = concrétions, couleur gris-bleu/verdâtre = réduction du fer).

### Les carbonates de calcium et de magnésium

Il est important de savoir si un sol contient du carbonate de calcium ou de magnésium (appelé généralement calcaire). En l'absence d'excès, la présence de cet élément a des conséquences

structurales, agronomiques, biologiques et trophiques considérées comme positives (Baize, 2000). Par ailleurs, elle est très utile pour approcher la pédogenèse (carbonatation, décarbonatation). Pour les sols dont on soupçonne la présence de calcaire (substrat carbonaté sous-jacent), on entreprend le test d'effervescence par contact d'échantillons de terre avec de l'acide chlorhydrique. L'intensité de la réaction permet de déterminer l'importance du carbonate de calcium. Dans le cas où le sol contient du carbonate de magnésium, la réaction à froid est difficile à obtenir même lorsque ce carbonate est abondant. L'effervescence reste observable si l'acide est légèrement réchauffé dans les mains ou si la terre est finement émiettée.

#### 1.1.4. Des données Sol complétées par l'ouverture de fosses pédologiques

Les informations issues des sondages à la tarière doivent être complétées par l'ouverture de fosses pédologiques qui permettent de décrire les sols en condition naturelle non perturbée. Par ailleurs, la description prend en compte davantage de paramètres et autorise la collecte d'échantillons sans risque de contamination entre horizons qui viendrait fausser l'analyse de leurs propriétés. Une fosse pédologique représente un volume 1,5 m<sup>3</sup> de terre environ qu'il faut excaver à la main ou au moyen d'une pelle mécanique. En raison du nombre important de fosses à ouvrir, des efforts à produire et du caractère chronophage de ce travail, l'intervention d'un terrassier a été nécessaire.

#### Les critères du nombre et du positionnement des fosses pédologiques

Les données Sol recueillies préalablement aux sondages dans le cadre du RRP Haute-Normandie, du RMQS Normandie et des études pédologiques que nous avons menées précédemment dans d'autres contextes ainsi que les moyens financiers définis pour l'ouverture des fosses et pour l'analyse des profils de sol sont les premiers critères retenus pour estimer le nombre de fosses à prospector. Celui-ci a été arrêté après avoir réalisé tous les sondages tarière afin d'être sûr de ne pas écarter des sols que nous n'aurions pas identifiés initialement. Finalement, nous avons engagé l'ouverture de 30 fosses pédologiques.

Le positionnement des fosses résulte d'un arbitrage entre prise en compte de la diversité des principaux types de sol rencontrés sur le terrain dans le cadre des sondages tarière, la volonté de répartir les fosses de manière homogène sur le territoire et les autorisations accordées ou refusées par les exploitants/propriétaires des parcelles retenues.

#### Les variables descriptives des sols de fosse

Les descriptions des profils de sol issus des fosses s'appuient sur des fiches de relevés beaucoup plus détaillées que celles utilisées pour les profils reconstitués avec la tarière. Nous avons opté pour le modèle STIPA de l'INRAE (cf. annexe 1). Les variables descriptives complètent celles déjà présentées à propos des sondages tarière sur le plan structural et biologique.

Les données structurales d'un horizon expriment la façon selon laquelle s'arrangent les particules élémentaires (sables, limons, argiles, matières organiques) en formant ou non des volumes élémentaires macroscopiques appelés agrégats. La structure est une notion très importante car elle conditionne la circulation de l'air et de l'eau et l'enracinement (Baize *et al.*, 2013). Sa description est délicate et nécessite d'observer des sols non perturbés. Il s'agit d'une propriété qui s'exprime plus ou moins et différemment au cours du temps. Généralement, on distingue les structures apédiques (sans agrégats) et les structures pédiques (à agrégats). Les premières sont induites par un manque de cohésion des particules entre elles (structure particulaire) ou par absence de fissures entre les particules (structure massive). Les secondes sont générées principalement soit par l'activité biologique (structures grenues et grumeleuses) soit par les variations de volume du sol liées aux cycles d'humectation/dessiccation (structures polyédriques).

Les données biologiques témoignent de l'activité des organismes du sol et du système racinaire des végétaux ainsi que de son état sanitaire. Les organismes du sol participent à la décomposition de la matière organique libérant des éléments nutritifs essentiels, tels que l'azote, le phosphore et le potassium. Ils contribuent à la formation du sol en décomposant les roches et les minéraux et en aidant à la formation de l'humus, une fraction organique riche en éléments nutritifs. Ils améliorent également la structure du sol, favorisant son aération et la circulation de l'eau. Ils sont essentiels au maintien de la fertilité du sol, à la croissance des plantes, à la régulation des cycles biogéochimiques et à la santé globale des écosystèmes terrestres.

Les données relatives aux racines renvoient aux conditions de développement des végétaux et aux interrelations Sol/Plante. Les racines améliorent la structure du sol en le fragmentant et en favorisant la formation d'agrégats. Cela favorise la circulation de l'air et de l'eau, ainsi que le développement des micro-organismes bénéfiques. Les racines ancrent les plantes dans le sol, assurant leur stabilité et les empêchant d'être délogées par l'érosion. Elles entrent en interaction avec les micro-organismes du sol qui peuvent mutuellement bénéficier de cette relation. Elles ont également la capacité de séquestrer du carbone dans le sol.

### Echantillonnage des fosses et données analytiques de laboratoire.

Les profils de sol issus des fosses pédologiques ont permis de préciser la nature et le nombre des horizons qui les composent. Chaque horizon a fait l'objet d'un prélèvement d'échantillon pour être analysé en laboratoire. Ces échantillons ont été conditionnés et acheminés auprès du LANO, laboratoire agréé par le MASA afin d'analyser les propriétés physiques et physico-chimiques des 30 profils de sol.

Les paramètres analytiques retenus sont présentés ci-dessous en fonction de la typologie des horizons :

<b>Horizons acides</b>	<b>Horizons carbonatés</b>	<b>Horizons recarbonatés</b>
Granulométrie 5 fractions	Granulométrie 5 fractions	Granulométrie 5 fractions
C organique et N total	C organique et N total	C organique et N total
pH eau	pH eau	pH eau
CEC Metson	CEC Metson	CEC Metson
Bases échangeables et taux de saturation	Bases échangeables et taux de saturation	Bases échangeables et taux de saturation
Aluminium échangeable	Calcaire total	Aluminium échangeable
	Calcaire actif	Calcaire total
		Calcaire actif

## 1.2. Des données ponctuelles à la représentation cartographique des sols

### 1.2.1. Prédiction du contenu pédologique sur le territoire de la MRN

La représentation spatiale des données Sol issues des sondages et des fosses pédologiques relève d'une démarche d'interpolation dont l'objectif est de fournir une estimation raisonnablement précise des types de sol et de leurs propriétés entre les points de données connus. Cette technique est largement utilisée dans de nombreux domaines en s'appuyant sur des algorithmes informatiques. En cartographie des sols, cette interpolation directe est impossible sur la base de la très faible représentativité des points de sondage par rapport aux imposants volumes que constituent les couvertures pédologiques.

Pour interpoler le plus rigoureusement possible, il faut passer par un raisonnement scientifique classique faisant intervenir l'observation, l'établissement d'une hypothèse sur la répartition des sols, la construction d'une règle formalisant cette répartition et des essais de validation (Legros, 1996). Cependant, la facilité relative du positionnement des types de sol ne doit pas occulter la grande difficulté du placement des limites entre les unités de sol.

### 1.2.2. La délimitation des sols

Le tracé des limites est l'aboutissement du travail de cartographie. Il représente donc une partie essentielle. Il existe deux grands types de limites : les limites nettes et les limites floues (Legros, 1996). Les premières sont observables au moins localement. On peut les suivre sur le terrain. La plupart du temps, on identifie facilement la raison de l'apparition de telles limites, en raison par exemple de rupture topographique, de changement de valeurs de pente, du passage d'un type de roche à un autre. Les secondes sont moins faciles à appréhender car il s'agit de limites progressives. C'est le cas par exemple de la délimitation entre deux sols sur la base de leur épaisseur. Sur un versant à pente modérée, l'épaisseur tend généralement à s'accroître très progressivement lorsqu'on se rapproche de sa partie basale. La limite est impossible à trouver car il n'y a pas de limites naturelles observables. La limite floue permet alors de répondre plus fidèlement à la réalité du terrain. Néanmoins, cette procédure cartographique s'accommode mal avec la représentation spatiale des fonctionnalités des sols. Le choix a donc porté sur des limites nettes.

Si on demande à un cartographe pédologue expérimenté de tracer la limite entre deux unités de sol, il va opérer très vite de manière presque intuitive, sans nécessairement exprimer chaque détail de la démarche qu'il suit. Cependant, cette délimitation n'est ni hasardeuse, ni arbitraire car elle repose sur une masse d'informations considérable. Le positionnement des limites par le cartographe est le résultat d'une analyse combinatoire de multiples facteurs révélant les logiques de répartition spatiale des sols. La compréhension de ces logiques conduit à proposer une modélisation déterministe de la répartition des sols dans l'espace en explicitant les relations entre les variables intrinsèques aux sols (épaisseur, texture, pédogenèse...) avec les variables extrinsèques (relief, hydrologie, histoire géologique, climat, anthropisation...).

Au niveau local, l'élaboration et la confirmation des limites entre les types de sol résultent de la représentation du positionnement des couvertures pédologiques par l'intermédiaire des concepts de lithoséquences, de toposéquences, de chronoséquences, de bioséquences et de climatoséquences (Duchaufour *et al.*, 2020).

Une lithoséquence exprime les variations latérales des organisations pédologiques en relation avec les variations de roches. Les toposéquences rendent compte des variations latérales sous l'effet des caractéristiques topographiques (forme de la pente, position sur le versant, morphologie et orientation des surfaces). Les chronoséquences soulignent la présence de variations latérales en lien avec l'âge des surfaces topographiques ou avec l'âge des roches, donc avec l'âge du début de l'évolution pédologique observable aujourd'hui. Les bioséquences révèlent l'existence de variations latérales des sols sous l'action des occupations humaines passées et actuelles (herbages, cultures). Enfin, les climatoséquences visent à souligner l'influence majeure du climat et, plus précisément dans notre région tempérée à influence océanique, des cumuls de précipitations, sur les mécanismes de la formation des sols. Ce facteur de la pédogenèse est habituellement pris en compte pour des échelles globales de représentation cartographique, ce qui n'est pas adapté à l'emprise géographique de la MRN. Ce concept n'a donc pas été retenu pour délimiter les types de sol.

L'approche combinatoire de ces différentes séquences a permis de dresser les limites entre les unités de sol sur le territoire de la Métropole.

### 1.2.3. Construction de la maquette

Sur la base des délimitations nettes des sols, une maquette cartographique en version papier est réalisée à partir des cartes topographiques au 25 000ème. L'utilisation de cette échelle permet d'interpoler les observations de terrain qui ont été reportées durant les investigations.

Il existe plusieurs règles pour représenter de manière adéquate les limites (cf. Fig.7). Compte tenu du support utilisé et de la restitution cartographique finale envisagée au format numérique (échelle du 50 000ème), nous avons tenu à représenter sur la maquette les limites telles que nous les avons pensées. Dans quelques cas, il a été choisi d'accentuer les limites afin de permettre une bonne visualisation d'un type de sol à faible extension spatiale ou de supprimer une limite et donc une unité de sol bien trop faible en surface considérant que la localisation de la couverture pédologique était trop micro-locale et ne s'adaptait pas à une visualisation au 50 000ème.

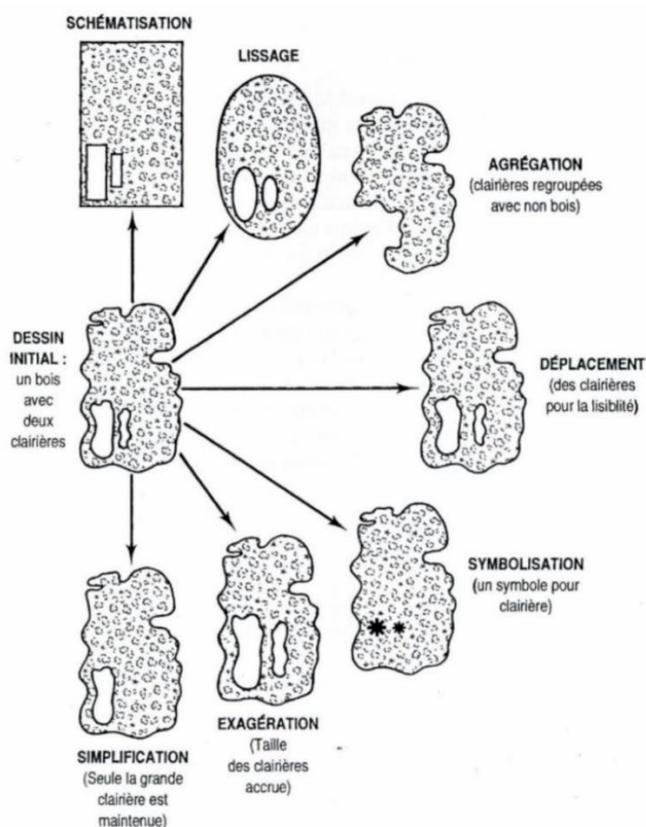


Fig.7 : Règles de représentation des limites (Source : Legros J. P., 1996)

La délimitation des types de sol et de leurs propriétés suppose d'engager en tout point du territoire une analyse spatiale permettant de remobiliser les concepts de cartographie des sols évoqués précédemment. Pour faciliter cette analyse, nous avons recours à l'étape du pastillage qui permet de retranscrire sur un fond de carte topographique au 1/25 000, au niveau de chaque point de sondage reporté sur ce fond, les données majeures extraites des fiches de relevés des sondages. Il s'agit du nom du sol, de l'épaisseur, de la texture et de la charge en éléments grossiers du profil de sol. Ces éléments sont reportés sous la forme de codes numériques et de pastilles de couleur. Par exemple un sol brun, d'une épaisseur de 50 cm, de texture limono-sableuse et contenant 10% d'éléments grossiers sera codé sous la forme 3-4-8-4 et reporté sur un fond carte topographique à l'endroit du sondage qui a permis cette observation, endroit spécifié par une pastille marron (démarche plus largement décrite dans la partie méthodologie consacrée à l'élaboration du Référentiel Sol de la Métropole). Cette retranscription sous cette forme facilite grandement la compréhension des logiques de répartition des

sols parce qu'elle offre une vue synoptique des liens entre types de sol et composantes de la pédogenèse.

L'outil informatique a été utilisé pour procéder à la construction de la carte des sols. Nous avons numérisé la carte papier en s'appuyant sur le scan 25 de l'IGN analogue à celui de la maquette. Ce travail a nécessité beaucoup de temps dans la mesure où nous avons créé en parallèle une base de données spécifique à la carte. Celle-ci permet, d'une part, de rappeler les caractéristiques générales de chaque unité de sol et, d'autre part, d'envisager une cartographie thématique des principales propriétés édaphiques à l'échelle du département. Les variables retenues renvoient au nom du sol selon le Référentiel pédologique 2008, à l'épaisseur totale du sol, aux textures de surface et de profondeur, au % d'éléments grossiers, au réservoir utile, aux surplus hydrologiques et déficits hydriques.

La représentation graphique des types de sol suppose de faire appel aux règles de sémiologie graphique. En premier lieu, la carte doit être facilement compréhensible. Il est donc nécessaire de travailler dans un esprit de synthèse pour atteindre une bonne lisibilité. Deuxièmement, il ne faut pas oublier que les couleurs sont les éléments les plus directement visibles. Elles doivent être employées pour les informations essentielles. Enfin, on tiendra compte de la logique. Ainsi, les sols hydromorphes sont représentés en bleu et les sols brunifiés en marron ! La représentation cartographique résulte d'un compromis intégrant tous ces éléments de recommandation.

Il a été décidé tout d'abord d'utiliser la couleur pour rappeler les processus de pédogenèse. Par exemple, le jaune évoque la carbonatation, l'orange la décarbonatation, le rose le lessivage, le bleu l'hydromorphie. La clarté des couleurs a été ensuite employée pour exprimer les différences d'épaisseur pour un même type de sol. Un sol brun très épais sera représenté en marron foncé et un sol brun peu épais en marron clair.

#### 1.2.4. Numérisation de la maquette et sémiologie

L'outil informatique a été utilisé pour procéder à la construction de la carte des sols. Nous avons numérisé la carte papier en nous appuyant sur le scan 25 de l'IGN analogue à celui de la maquette. Ce travail a nécessité beaucoup de temps dans la mesure où il a été nécessaire de créer parallèlement une base de données spécifique à la carte. Celle-ci permet, d'une part, de rappeler les caractéristiques générales de chaque unité de sol et, d'autre part, d'envisager une cartographie thématique des principales propriétés édaphiques à l'échelle du département. Les variables retenues renvoient au nom du sol selon le Référentiel pédologique 2008, à l'épaisseur totale du sol, aux textures de surface et de profondeur, au % d'éléments grossiers, au réservoir utile, aux surplus hydrologiques et déficits hydriques.

La représentation graphique des types de sol suppose de faire appel aux règles de sémiologie graphique. En premier lieu, la carte doit être facilement compréhensible. Il est donc nécessaire de travailler dans un esprit de synthèse pour atteindre une bonne lisibilité. Deuxièmement, les couleurs qui sont les éléments les plus directement visibles doivent être employées pour les informations essentielles tout en tenant compte de la logique : ainsi les sols hydromorphes sont-ils représentés en bleu et les sols brunifiés en marron. La représentation cartographique résulte donc d'un compromis intégrant tous ces éléments de recommandation.

Il a été décidé tout d'abord d'utiliser la couleur pour rappeler les processus de pédogenèse. Par exemple, le jaune évoque la carbonatation, l'orange la décarbonatation, le rose le lessivage, le bleu l'hydromorphie. La clarté des couleurs a été employée ensuite pour exprimer les différences d'épaisseur pour un même type de sol. Un sol brun très épais sera représenté en marron foncé et un sol brun peu épais en marron clair.

### 1.2.5. Concepts mobilisés et méthode de spatialisation des Unités Cartographiques de Sol

Les observations de terrain et les résultats de laboratoire permettent de réaliser une cartographie des sols en mobilisant les concepts de base du programme Inventaire, Gestion, Conservation des Sols (Laroche *et al.*, 2014). Les observations de terrain ponctuelles obtenues à partir des sondages tarière ou des fosses pédologiques sont qualifiées de « Profil ». Il ressort de ces profils une succession d'horizons jusqu'au substrat ou matériel parental.

« L'Unité Typologique de Sol » (UTS) représente une portion de la couverture pédologique qui présente les caractéristiques d'une pédogenèse (lessivage, brunification par exemple) et qui présente en tout lieu de l'espace la même succession d'horizons, l'un ou l'autre de ces horizons pouvant être absent. La « strate » représente, quant à elle, la variation dans l'espace d'un horizon, ou d'une couche issue d'un horizon ou d'un regroupement de plusieurs horizons (lorsque ceux-ci présentent entre eux des variations très faibles de leurs caractéristiques).

Les sols observés ponctuellement par des sondages et des fosses pédologiques qui présentent des caractéristiques pédologiques similaires et de même intensité sont alors considérés comme appartenant à la même Unité Typologique de Sol (UTS). La localisation de ces observations ponctuelles va permettre de définir l'extension spatiale de l'UTS.

Pour réaliser une cartographie des UTS, il faut chercher à délimiter la portion de la couverture pédologique correspondant à chaque UTS sous la forme de plages cartographiques. On pourra soit délimiter des plages cartographiques où une seule UTS est présente, soit délimiter des plages cartographiques où plusieurs UTS sont présentes. Dans le premier cas, on parle d'unités pures, et dans le second cas, d'unités complexes.

**Compte tenu de la précision des échelles cartographiques retenues (1/50 000 en zone A et N et 1/10 000 en zone AU), les plages cartographiques sont exclusivement composées d'UTS pures. Ces ensembles pédologiques sont appelés UCS (Unités Cartographiques de Sol) et sont composés de couches à l'intérieur desquelles les caractéristiques pédologiques sont relativement homogènes.**

## 1.3. Stockage et contrôle qualité des bases de données via la plateforme DONESOL Web

Depuis 1992, DoneSol est la base de données nationale française structurant et regroupant les données ponctuelles et surfaciques des études pédologiques. Elle est portée par le GisSol et l'Unité Info & Sols de l'INRAe via DoneSolWeb (Groleau *et al.*, 2004). Cette interface web de la base de données nationale DoneSol permet, via un compte sécurisé et personnel, de saisir, de consulter et d'archiver durablement ses données pédologiques dans cette structure adaptée et de bénéficier d'outils associés comme Sivercoh qui est un outil de de vérification de la qualité des données saisies.

Pour bénéficier de l'interface DoneSolWeb, nous avons demandé auprès d'Info&Sols la création d'une étude qui porte le n° 33341. Dans DoneSolWeb, les données sont soit géographiques, soit sémantiques.

Les données géographiques permettent la localisation spatiale des objets cartographiés. Elles sont gérées au sein d'un Système d'Information Géographique (SIG), et comportent des contours fermés appelés polygones et qui représentent les limites des plages cartographiques, et des points qui représentent l'emplacement des observations ponctuelles.

Les données sémantiques permettent de décrire par un ensemble de variables les caractéristiques des différents objets (UCS, profils, horizons, analyses...). Ces variables sont structurées sous la forme de tables gérées dans un Système de Gestion de Base de Données Relationnel (SGBD Relationnel). L'ensemble sémantique seul forme la base de données DoneSol. La saisie des données Sol produite sur le territoire de la MRN relève spécifiquement de ces données sémantiques dont la qualité a été vérifiée par les procédures de contrôle de Donesol.

## 2. Les potentialités agronomiques des sols

La qualité agronomique des sols se réfère à la capacité d'un sol à soutenir la croissance des plantes de manière productive et durable. Ce potentiel agronomique dépend des paramètres suivants (DEPRET *et al.*, 2013) :

- la texture du sol, qui fait référence à la proportion relative de sable, de limon et d'argile, influence la capacité du sol à retenir l'eau et les éléments nutritifs.
- la structure du sol, qui concerne l'agencement des particules du sol en agrégats, affecte la perméabilité à l'eau, la circulation de l'air et la croissance des racines.
- la teneur en matière organique dans le sol fournit des éléments nutritifs essentiels, améliore la structure du sol et favorise les activités microbienne et biologique bénéfiques.
- le pH du sol agit sur la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes. Un pH approprié est essentiel pour une croissance végétale optimale. Il est également un indicateur de présence des communautés microbiennes et animales fonctionnelles.
- la Capacité d'échange cationique (CEC) mesure la capacité du sol à retenir et à échanger des ions nutritifs. Un sol avec une CEC élevée peut mieux fournir des éléments nutritifs aux plantes.
- la sensibilité du sol à l'érosion hydrique et à la compaction peut diminuer la qualité agronomique en réduisant la disponibilité des nutriments et en limitant la croissance des racines.
- l'activité biologique, représentée par les organismes du sol tels que les bactéries, les champignons et les vers de terre jouent un rôle crucial dans la décomposition de la matière organique et la libération d'éléments nutritifs par l'utilisation de la matière organique. Cette activité est la base de la qualité globale du sol et de sa santé.
- les usages du sol telles que la rotation des cultures, l'apport d'amendements organiques, l'irrigation, le drainage et l'utilisation des produits chimiques comme les phytosanitaires, l'imperméabilisation des sols, les retournements des sols (déblais/remblais) peuvent avoir un impact significatif sur la qualité agronomique des sols en agissant sur un ou plusieurs paramètres, enclenchant alors une réaction en chaîne des effets et modifiant les cycles biochimiques qu'ils remplissent, notamment le stockage du carbone.

La qualité agronomique est déterminée par des modèles et des méthodes qui peuvent être utilisés individuellement ou combinés pour fournir une évaluation complète de la qualité agronomique des terres. Il existe des indices de fertilité du sol qui évaluent les niveaux de nutriments essentiels dans le sol, tels que l'azote, le phosphore, le potassium, des indices de capacité du sol qui évaluent la capacité du sol à supporter les activités agricoles, telles que la charge des équipements, le piétinement du bétail en prenant en compte des paramètres tels que la compaction du sol, la texture du sol la structure du sol, ou bien encore des modèles de cartographie de la qualité des sols pour évaluer la qualité agronomique des terres à l'échelle régionale ou nationale. Ces modèles intègrent notamment des données sur la texture du sol, la topographie, la végétation et les pratiques agricoles pour estimer la qualité agronomique des terres.

Il existe plusieurs types de modèles de cartographie de la qualité agronomique des sols, chacun utilisant différentes méthodes et données pour évaluer et représenter les caractéristiques des sols. Sur la base des travaux de Bruckert (1989), Patrick Le Gouée a développé son propre modèle (Le Gouée, 2017) : le modèle SQUAT (**S**patialisation de la **Q**ualité **A**gronomique des **T**erres).

## 2.1. Le modèle SQUAT

### 2.1.1. Le choix d'un modèle additif

La détermination de la qualité agronomique des sols peut résulter de modèles additifs ou multiplicatifs. Dans le premier cas, les paramètres d'entrée sont additionnés pour obtenir une somme que l'on pourra simplifier par une étape de classification. Ces modèles sont à privilégier lorsque les effets des différents paramètres d'entrée semblent être indépendants les uns des autres. Pour les modèles multiplicatifs, les variables de départ sont multipliées ensemble pour obtenir un produit qui pourra également faire l'objet d'une simplification par reclassement. Ces modèles sont souvent utilisés lorsque les valeurs de chaque variable semblent être proportionnelles à une valeur étalon. Or, dans le cas du modèle SQUAT, certaines données d'entrée sont de nature différentielle, ce qui exclut *de facto* l'emploi d'un modèle multiplicatif.

### 2.1.2. Les données d'entrée du modèle

Le modèle SQUAT mobilise 4 paramètres qui vont être combinés entre eux pour obtenir une 1<sup>ère</sup> note de qualité agronomique et 2 paramètres susceptibles de déclasser la 1<sup>ère</sup> note pour obtenir la note finale. Les 4 paramètres d'entrée du modèle fournissent des informations sur l'épaisseur, la texture, le déficit hydrique des sols ainsi que sur l'exposition des versants. Les critères de déclassement font référence à l'hydromorphie et les pentes excessives et sont appliqués en situation d'agriculture conventionnelle et maraîchère.

#### L'épaisseur des sols

Ce paramètre est essentiel à prendre en compte pour estimer la qualité agronomique des sols car il intervient à différents niveaux sur le potentiel de production de biomasse. L'épaisseur du sol influence sa capacité à retenir l'eau. Les sols profonds ont une plus grande capacité à stocker l'eau, ce qui peut être très bénéfique pour les cultures pendant les périodes de développement en situation de déficit pluviométrique. Les sols les plus épais ont généralement une plus grande capacité de rétention des nutriments, ce qui peut favoriser la croissance des cultures en fournissant un approvisionnement continu en éléments nutritifs. Les cultures ont des exigences différentes en termes de profondeur des racines. Cependant, les sols les plus épais offrent généralement plus d'espace pour la croissance des racines, ce qui peut permettre aux cultures d'explorer davantage le sol pour l'eau et les nutriments. Enfin, les sols épais peuvent parfois fournir un habitat pour une plus grande diversité de microorganismes du sol, ce qui peut contribuer à des processus bénéfiques tels que la décomposition des matières organiques et la fixation de l'azote atmosphérique.

Le modèle SQUAT propose une classification du paramètre épaisseur en 6 classes : < 10 cm, [10 ; 30 cm[; [30 ; 50 cm[; [50 ; 80 cm[; [80 ; 120 cm[; >=120 cm. Celles-ci correspondent respectivement aux notes de qualité agronomique 1, 2, 3, 4, 5, 6 relatives au paramètre épaisseur (1 = faible qualité, 6 = forte qualité).

#### La texture des horizons de surface

Ce deuxième critère conditionne tout d'abord les conditions de drainage et de rétention de l'eau pluviale dans le sol. Les sols sableux ont généralement un bon drainage mais retiennent moins d'eau. En revanche, les sols argileux retiennent l'eau mais limitent fortement le drainage. Les sols limoneux

offrent un compromis entre ces deux extrêmes. Le bon équilibre entre drainage et rétention d'eau est essentiel pour la croissance optimale des cultures.

La texture affecte également le degré d'aération du sol. Les sols sableux ont tendance à être bien aérés alors que les sols argileux peuvent être plus compacts et génèrent des situations d'anoxie. Or, une bonne aération favorise la respiration des racines et le développement des microorganismes du sol. Par ailleurs, ce paramètre influence la capacité du sol à retenir les nutriments essentiels pour la croissance des cultures. Les sols argileux ont une surface spécifique plus grande et peuvent retenir plus de nutriments, tandis que les sols sableux ont une capacité de rétention des nutriments moindre.

Le modèle SQUAT propose une classification du paramètre texture en 6 classes regroupant plusieurs types de texture (référence diagramme texturale de Jamagne en 16 classes). Celles-ci correspondent respectivement aux notes de qualité agronomique 1, 2, 3, 4, 5, 6 relatives à la texture (1 = faible qualité, 6 = forte qualité).

### Le déficit hydrique

Il s'agit d'un paramètre pédo-climatique puisqu'il nécessite de prendre en compte les données climatiques (précipitations et ETP) et le Réservoir utile des sols. Ces données vont être combinées dans un modèle de bilan hydrique afin d'obtenir une valeur cumulée du déficit hydrique à l'échelle annuelle (valeur exprimée en mm) moyennée sur la normale climatique 1981-2010. Afin de tenir compte des contextes contrastés de plateau et de vallée favorables à l'apparition de topo-climat, il a été appliqué un bilan hydrique spécifique à chacun de ces contextes à partir des données de la station Météo France de Rouen-Boos pour les secteurs de plateau et celles de la station de Petiville pour les espaces de vallée (cf. Fig. 8).

#### Petiville (alt. 15 m)

NORMALE 1981-2010	J	F	M	A	M	J	JL	A	S	O	N	D	AN
T (°C)	5,2	5,7	7,8	11,2	14,0	17,0	19,1	17,8	16,3	13,2	8,8	4,5	11,7
P (mm)	72	54	61	55	62	63	61	65	68	94	81	91	826
ETP Penman (mm)	11	19	47	74	100	116	123	108	65	33	13	9	718
Réserve Utile	100	100	100	100	81	42	0	0	0	3	63	100	
Total eau disponible (P + RU)	172,1	153,7	160,5	154,9	142,6	105,6	61,3	64,6	68,1	96,7	144,1	190,6	
Evapotranspiration réelle	11,3	18,8	46,7	74,1	100,4	105,6	61,3	64,6	65,1	33,4	12,6	8,7	602,6
Déficit hydrique D (ETP - ETR)	0	0	0	0	0	10,7	61,7	43,4	0	0	0	0	115,8
Reconstitution RU ("4" - "5")	160,8	134,9	113,8	80,8	42,2	0	0	0	3	63,3	131,5	181,9	
Eau dispo. écou. ("7" -RU pleine)	60,8	34,9	13,8	0	0	0	0	0	0	0	31,5	81,9	222,9

#### Rouen-Boos (alt. 152 m)

NORMALE 1981-2010	J	F	M	A	M	J	JL	A	S	O	N	D	AN
T (°C)	3,7	4,2	7,0	9,2	12,7	15,5	17,8	17,8	14,9	11,4	7,0	4,2	10,5
P (mm)	76	60	67	59	74	64	69	65	66	84	77	91	852
ETP Penman (mm)	11	19	47	74	100	116	123	108	65	33	13	9	718
Réserve Utile	100	100	100	100	85	59	6	0	0	0	51	100	
Total eau disponible (P + RU)	176,3	160,4	167,1	159,2	159,4	122,7	75,3	65,1	65,5	83,9	127,3	190,9	
Evapotranspiration réelle	11,3	18,8	46,7	74,1	100,4	116,3	75,3	65,1	65,1	33,4	12,6	8,7	627,8
Déficit hydrique D (ETP - ETR)	0	0	0	0	0	0	47,7	42,9	0	0	0	0	90,6
Reconstitution RU ("4" - "5")	165	141,6	120,4	85,1	59	6,4	0	0	0,4	50,5	114,7	182,2	
Eau dispo. écou. ("7" -RU pleine)	65	41,6	20,4	0	0	0	0	0	0	0	14,7	82,2	223,9

Fig. 8 : Bilans hydriques de Petiville et de Rouen-Boos

Le déficit hydrique joue un rôle fondamental sur la croissance des productions végétales agricoles. Le manque d'eau peut limiter la croissance des couverts. Les plantes soumises à un stress hydrique peuvent alors présenter un retard de croissance, une diminution de la production de biomasse et une réduction du rendement des cultures. Le déficit hydrique peut entraîner également une diminution de la qualité des produits agricoles ou augmenter la sensibilité des végétaux aux maladies et aux

ravageurs en raison d'un système immunitaire affaibli. Enfin, il peut engendrer une diminution de la biodiversité et de la résilience des écosystèmes agricoles.

Le modèle SQUAT propose une classification du paramètre déficit hydrique en 6 classes : < 20 mm, [20 ; 60 mm[; [60 ; 100 mm[; [100 ; 140 mm[; [140 ; 180 mm[; >=180 mm. Celles-ci correspondent respectivement aux notes de qualité agronomique 6, 5, 4, 3, 2, 1 relatives au déficit hydrique (1 = faible qualité, 6 = forte qualité).

### L'exposition des versants

L'exposition des versants intervient dans la redistribution des flux de chaleur et de lumière apportés par le soleil. Les versants tournés vers le sud bénéficient d'un ensoleillement plus important que ceux orientés vers le nord. Or, l'exposition solaire peut influencer la température du sol, la durée de la période de croissance des végétaux et la quantité de lumière disponible pour les plantes. Les versants bien exposés au soleil favorisent la croissance des cultures qui vont tirer profit d'une chaleur et d'une lumière plus abondante. Dans les situations de pente nulle ou très faible (< 1%), l'exposition est un paramètre qui n'impacte pas la qualité agronomique des sols. C'est la raison pour laquelle, dans ces contextes topographiques particuliers, ce critère n'est pas pris en compte dans la modélisation.

Le modèle SQUAT propose une classification du paramètre exposition en 6 classes : Nord, Nord-Est/Nord-Ouest, Est/Ouest, Sud-Ouest, Sud-Est et Sud. Celles-ci correspondent respectivement aux notes de qualité agronomique 1, 2, 3, 4, 5, 6 relatives à l'exposition (1 = faible qualité, 6 = forte qualité).

### L'hydromorphie des sols

L'hydromorphie des sols décrit les conditions dans lesquelles un sol est saturé en eau sur une période plus ou moins longue. L'hydromorphie peut résulter de différents facteurs qui peuvent se cumuler tels que des précipitations abondantes, un faible drainage, une nappe phréatique proche de la surface du sol ou une topographie basse qui favorise l'accumulation d'eau. L'hydromorphie peut provoquer une prise en masse de la structure du sol, ce qui réduit la porosité et la capacité d'infiltration de l'eau. Cela peut entraîner des problèmes d'aération des racines et de circulation de l'eau et des nutriments dans le sol pour les espèces végétales liées aux productions agricoles (ex : céréales), ce qui ne sera pas le cas pour les communautés végétales adaptées à l'hydromorphie (ex végétation des mégaphorbiaies). Les sols hydromorphes peuvent être sujets à un lessivage accru des nutriments, en particulier des nutriments solubles comme les nitrates et les sulfates. Cela peut conduire à une perte de fertilité du sol et à des problèmes de nutrition des plantes.

L'impact négatif de l'hydromorphie sur la qualité agronomique des sols dépend du niveau d'apparition de l'engorgement en eau par rapport à la surface et de sa durée au cours de l'année. La classification du GEPPA des sols hydromorphes (cf. Fig.9) fait ressortir différents niveaux de contraintes agronomiques en agriculture conventionnelle et maraîchère pris en compte dans le modèle SQUAT. Aux classes III, IV, V et VI sont associés des points de déclassement de la note de qualité agronomique issue de la combinaison des notes des 4 paramètres d'entrée. On soustrait respectivement à cette 1<sup>ère</sup> note de qualité agronomique 1, 2, 3 et 4 points.

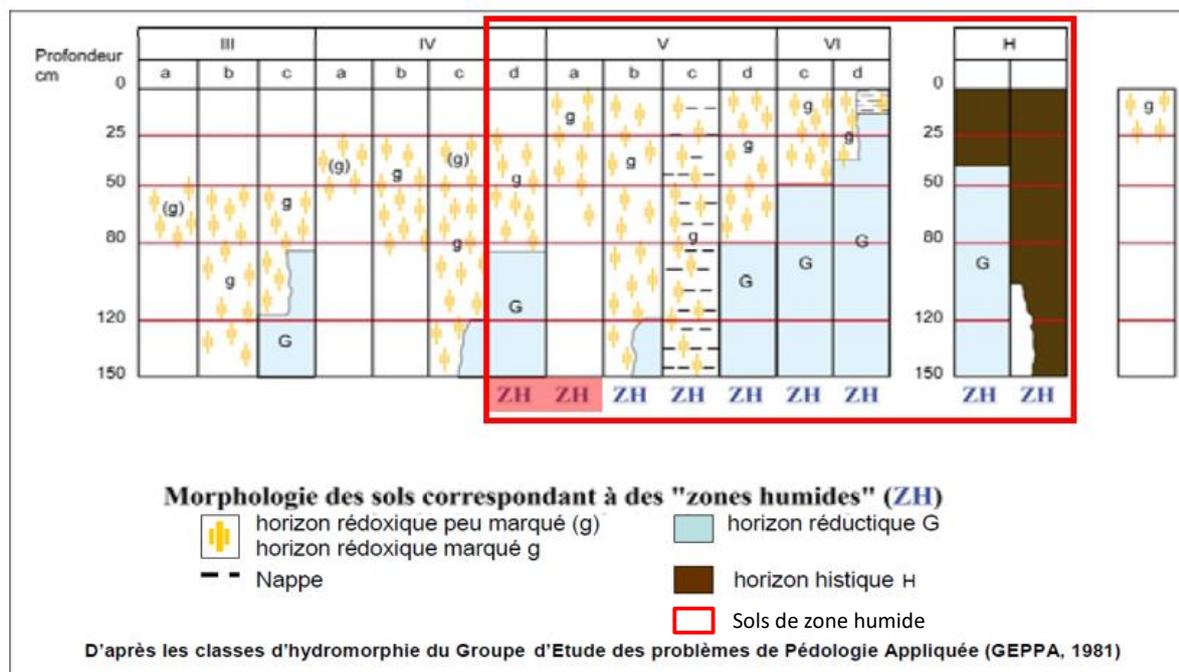


Fig. 9 : Classification du GEPPA des sols hydromorphes

### Les pentes excessives

Les pentes excessives favorisent l'apparition de l'érosion hydrique du sol qui conduit à une perte progressive de la couche arable du sol, qui est riche en nutriments et essentielle pour la croissance des plantes. Cette dynamique entraîne une réduction de la fertilité du sol et une perte de productivité agricole. Ces situations morphologiques induisent également un écoulement rapide des eaux de drainage à l'origine d'un dessèchement précoce et intense des sols en période sèche, ce qui peut compromettre la croissance des végétaux. Enfin, les pentes abruptes restreignent l'utilisation de machines agricoles nécessaires aux opérations de travail du sol, de traitements et de fertilisation qui permettent de se rapprocher des objectifs de rendement.

Les pentes excessives se répartissent dans les classes  $[10 ; 20 \%$  et  $\geq 20 \%$  et sont associées respectivement à 1 et 2 points de déclassement que l'on soustrait à la 1<sup>ère</sup> note de la qualité agronomique.

## 2.2. Déclinaison du modèle SQUAT en fonction des orientations de production agricole

Les paramètres d'entrée du modèle SQUAT et leur déclinaison en classes de valeurs avaient pour objectif premier d'estimer le potentiel agronomique des sols dans le cadre de pratiques issues de l'agriculture conventionnelle puisque celle-ci représente une partie significative de l'économie agricole française. Cette orientation de production concerne à la fois les petites, les moyennes et les grandes exploitations engagées dans une intensification et une spécialisation de leur système de production. Cela se traduit par l'utilisation intensive d'intrants chimiques, la pratique de la monoculture, le recours à une mécanisation lourde et la concentration sur un petit nombre de cultures ou de productions animales.

Cependant cette forme d'agriculture en France est confrontée à des défis environnementaux importants, tels que la pollution de l'eau et des sols, la perte de biodiversité, la dégradation des sols et l'érosion hydrique. L'évolution des pratiques agricoles est désormais nécessaire pour que

l'agriculture puisse s'adapter aux enjeux de demain et prendre part à la protection des sols et à l'atteinte de la neutralité carbone.

Parmi ces systèmes de production, le maraîchage et l'élevage extensif constituent des alternatives auxquelles se rallient un nombre croissant d'agriculteurs et de collectivités soucieuses de promouvoir des pratiques agricoles plus durables. C'est la raison pour laquelle il a été choisi de moduler la version initiale de SQUAT pour tenir compte des critères de qualité agronomique attendus en contexte de maraîchage et d'élevage.

### 2.2.1. Les paramètres d'entrée modulés en système maraîchage : texture et épaisseur

En maraîchage, les textures limoneuses et limono-sableuses confèrent aux sols de bonnes conditions de drainage des eaux pluviales susceptibles de réduire la propagation des maladies fongiques et une rétention en eau utile pour les végétaux satisfaisante tout au long de leur cycle de croissance. Ces textures favorisent la formation de structures grenues et grumeleuses qui favorise la perméabilité de l'air et de l'eau, ainsi que le développement des racines des plantes maraîchères.

Ces structures permettent également un bon échange de gaz dans le sol, ce qui est essentiel pour le bon état sanitaire des racines. Par ailleurs, les sols limoneux et limono-sableux ont tendance à être relativement fertiles : en effet ils contiennent généralement une quantité modérée de matière organique et de nutriments, ce qui peut réduire les besoins en fertilisation supplémentaire et favoriser la croissance saine des cultures maraîchères. Ces sols légers facilitent également les opérations de préparation du sol, de plantation et de récolte dans les cultures maraîchères. Enfin ces terres souples sont polyvalentes et peuvent soutenir une grande variété de cultures maraîchères, des légumes-feuilles comme la laitue et les épinards aux légumes-fruits comme les tomates et les poivrons.

Ces raisons expliquent que nous ayons affecté aux textures limoneuses et limono-sableuses les notes de qualité agronomiques les plus élevées relatives au paramètre texture (cf. Fig.10).

#### **Maraîchage**

Texture		
Jamagne	NQ*	
LS	6	Alo (argile lourde), A (argileuse), AL (argilo-limoneuse),
LMS/LLS	5	AS (argilo-sableuse), LA (limono-argileuse),
SL/LSA/LL/LM	4	LAS (limono-argilo-sableuse), LL (limon léger), LLS (limon léger sableux),
S/LAS/SA	3	LM (limon moyen), LMS (limon moyen sableux),
AS/AL/LA	2	LS (limono-sableuse), LSA (limono-sablo-argileuse)
A/Alo	1	S (sableuse), SL (sablo-limoneuse)

\* Notes de qualité

Fig. 10 : Notes de qualité des textures en système Maraîchage

Pour tous les couverts végétaux, l'épaisseur du sol intervient significativement sur le volume du réservoir utile. Un sol épais permettra de satisfaire les besoins hydriques des plantes tout au long de son cycle végétatif, ce qui n'est pas assuré dans le cas de sols minces. Toutefois, dans le cas de cultures maraîchères, les systèmes racinaires se développent de manière superficielle. Il en est ainsi pour les légumes-feuilles (laitues, choux, épinards) et les poireaux dont les racines se déploient sur les premiers décimètres, des légumes-fruit comme la tomate dont les racines se situent entre 30 centimètres et 60 centimètres de profondeur ou bien encore des carottes, des radis et des pommes de terre aux systèmes racinaires qui se développent entre 30 centimètres et 50 centimètres de profondeur.

Pour tenir compte des spécificités racinaires de ces cultures maraîchères (cf. fig.11), nous avons redéfini les classes d'épaisseur initiales < 10 cm, [10 ; 30 cm[ ; [30 ; 50 cm[ ; [50 ; 80 cm[ ; [80 ; 120 cm[ ; >=120 cm en leur faisant correspondre respectivement les notes 1, 3, 5, 6, 6, 6 relatives à l'épaisseur (1 = faible qualité, 6 = forte qualité).

### **Maraîchage**

Epaisseur	
cm	NQ
<10	1
[10; 30[	3
[30; 50[	5
[50; 80[	6
[80; 120[	6
>= 120	6

Fig. 11 : Notes de qualité des épaisseurs en système Maraîchage

### **2.2.2. Les paramètres d'entrée modulés en système d'élevage : texture, épaisseur et hydromorphie**

La texture des sols peut avoir un impact significatif sur l'élevage, notamment en ce qui concerne le bien-être des animaux, la gestion des pâturages et la production de fourrage. Les sols argilo-sableux et argileux conviennent à ce type de production agricole car, en retenant l'eau plus longtemps, ils offrent une surface souple en période sèche qui rend plus confortable le déplacement journalier des troupeaux et contribuent ainsi au bien-être animal. Par ailleurs, ces textures sont peu sensibles au compactage sous l'effet du piétinement répété du bétail pendant le pâturage, ce qui permet à ces sols de rester souples, contrairement aux sols à texture limoneuse.

En assurant une humidité prolongée dans les sols et en retenant une plus grande quantité de nutriments, les textures argileuses favorisent une meilleure croissance de l'herbe en période sèche et une meilleure qualité nutritionnelle pour les animaux, ce qui est rigoureusement le contraire pour les textures sableuses.

Ces éléments ont été pris en compte dans la notation des textures en système d'élevage (cf. Fig.12).

### **Élevage**

Texture		
Jamagne	NQ*	
AS	6	Alo (argile lourde), A (argileuse), AL (argilo-limoneuse),
A/AL/Alo	5	AS (argilo-sableuse), LA (limono-argileuse),
LA/LAS	4	LAS (limono-argilo-sableuse), LL (limon léger), LLS (limon léger sableux),
LSA/LM/LMS	3	LM (limon moyen), LMS (limon moyen sableux),
SA/LLs/LS	2	LS (limono-sableuse), LSA (limono-sablo-argileuse)
S/SL	1	S (sableuse), SL (sablo-limoneuse)

\* Notes de qualité

Fig. 12 : Notes de qualité des textures en système Élevage

Pour déterminer la qualité agronomique des sols en contexte d'élevage, nous avons fait le choix de ne pas retenir les paramètres épaisseur et hydromorphie pour plusieurs raisons.

Concernant l'épaisseur, il est difficile d'évaluer l'impact agronomique de ce paramètre dans ce contexte agricole car la profondeur racinaire nécessaire des herbages varie en fonction de différents facteurs, notamment le type de plante, les conditions du sol et le climat. Ainsi, chaque espèce herbacée a un système racinaire spécifique. Par exemple, les graminées, telles que le ray-grass ou la fétuque, ont généralement des systèmes racinaires profonds et étendus qui peuvent atteindre plusieurs mètres de profondeur. En revanche, les légumineuses comme la luzerne ont tendance à avoir des systèmes racinaires plus superficiels mais denses. Pour une même espèce, la profondeur racinaire peut considérablement varier en fonction de la texture du sol, de sa structure et de sa fertilité. Les sols sableux, plus séchants et moins riches en nutriments que les sols à texture fine, vont favoriser une pénétration racinaire plus profonde que les sols argileux. Les nuances topo-climatiques peuvent faire varier les quantités de précipitations et la température selon l'exposition des versants par rapport au soleil et aux vents dominants. L'état hydrique des sols qui en découle peut moduler la distribution des racines en profondeur.

Au sujet de l'hydromorphie, ce paramètre peut être ambivalent pour évaluer la qualité agronomique d'un sol parce qu'il peut être un atout ou un inconvénient pour les couverts herbacés au cours d'une même année. En période humide (novembre à mars), l'excès d'eau dans les sols peut entraîner l'apparition de zones boueuses dans les pâturages et favoriser le développement de maladies du sabot. Les conditions de déplacement du bétail sont rendues difficiles et l'excès d'eau dans les sols s'accompagne de l'installation d'une végétation hygrophile qui peut être difficilement pâturée par certaines races animales d'élevage. En période de dessèchement (avril à septembre), les sols hydromorphes témoignent d'un état hydrique satisfaisant qui peut garantir pendant plusieurs mois une bonne production fourragère, ce qui n'est plus le cas généralement pour les sols sains. Ce complément fourrager s'avère salubre au moment du pâturage estival.

### 2.2.3. Un modèle pour 3 scénarios

La modélisation de la qualité agronomique des sols repose sur des paramètres et une notation qui varient selon les orientations de production (cf. Fig.13).

#### SQUAT Système conventionnel

Facteurs pris en compte : **Épaisseur**, **Exposition** (quand la pente est supérieure à 1%), **Déficit Hydrique** et **Texture**.

Facteurs de déclassement : **Pente** et **Hydromorphie**.

#### SQUAT Système maraîchage

Facteurs pris en compte : **Épaisseur**, **Exposition** (quand la pente est supérieure à 1%), **Déficit Hydrique** et **Texture Maraîchage**.

Facteur de déclassement : **Pente** et **hydromorphie**.

#### SQUAT Système Élevage

Facteurs pris en compte : **Exposition** (quand la pente est supérieure à 1%), **Déficit Hydrique** et **Texture Élevage**.

Facteur de déclassement : **Pente**.

*Fig. 13 : Paramètres pour la détermination de la qualité agronomique des sols selon les 3 orientations de production*

Selon le nombre de critères retenus, la sommation des notes des différents critères fait l'objet d'une discrétisation en 6 classes pour obtenir la 1<sup>ère</sup> note de potentiel agronomique des sols (cf. Fig.14). On soustrait à cette note les points de déclassement des paramètres hydromorphie et pente pour obtenir la note finale. Il peut arriver que la note finale aboutisse à une valeur nulle ou négative. Dans ce cas, on leur affecte la note finale de 1.

4 critères		3 critères		2 critères	
Classes	NQ	Classes	NQ	Classes	NQ
[4-7[	1	[3-5[	1	[2]	1
[7-10[	2	[5-7[	2	[3-5[	2
[10-14[	3	[7-10[	3	[5-7[	3
[14-18[	4	[10-13[	4	[7-9[	4
[18-22[	5	[13-16[	5	[9-11[	5
[22-24]	6	[16-18]	6	[11-12]	6

Fig. 14 : nombre de critères retenus et discrétisation en 6 classes du potentiel agronomique

### 2.3. La nécessaire étape de validation et de vérification du modèle SQUAT

Les cartes de qualité agronomique des sols doivent être validées et vérifiées pour s'assurer de leur précision et de leur fiabilité. Cela peut impliquer la comparaison des prédictions du modèle avec des données de terrain indépendantes, des évaluations visuelles sur le terrain, ou des analyses de sensibilité pour évaluer l'incertitude associée aux prédictions du modèle. Le modèle SQUAT a été développé initialement en Normandie occidentale pour cartographier la qualité agronomique des sols dans les départements du Calvados, de la Manche et de l'Orne en contexte d'agriculture conventionnelle.

Les résultats d'une première version ont été soumis à l'avis de différents exploitants agricoles dans des contextes de grandes cultures, de polycultures-élevage et d'élevage. Un exemple de comparaison entre les valeurs prédites par le modèle et celles déterminées par les agriculteurs est présenté ci-dessous (cf. Fig.15).

Il ressort de cette comparaison un niveau de prédiction élevé mais qui était perfectible selon les agriculteurs en modifiant certains paramètres d'entrée du modèle. C'est ainsi que nous avons ajouté le paramètre exposition en lieu et place du paramètre pente que nous avons redéfini comme paramètre déclassant ; nous avons sorti également de la modélisation le paramètre charge caillouteuse.

Ainsi, la version mobilisée pour le territoire de la MRN ainsi que ses déclinaisons attestent d'un niveau prédictif robuste.

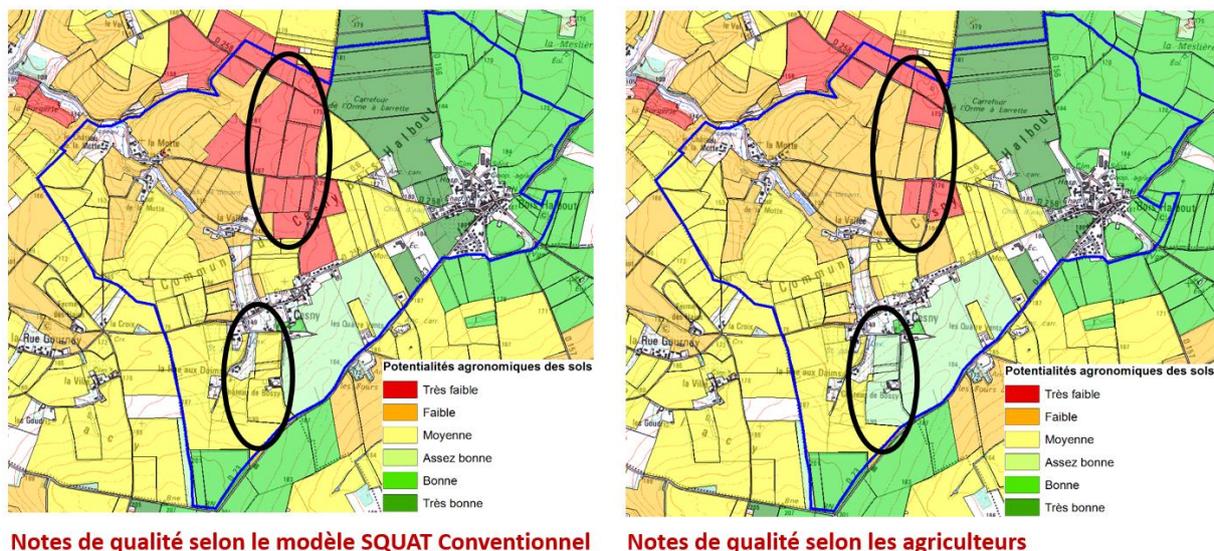


Fig. 15 : Valeurs de potentialité agronomique prédites par le modèle SQUAT (à gauche) et estimées par les agriculteurs (à droite)

## 2.4. Les Unités Spatiales d'Intégration (USI)

Nous avons fait le choix de représenter les données du potentiel agronomique des sols sur la base d'un carroyage du territoire composé de mailles élémentaires carrée (USI) dont la surface est adaptée au niveau de précision des données de la base de données Sol. Pour les secteurs classés en zone naturelle et agricole, la cartographie des sols au 1/50 000 permet de proposer un carroyage de mailles élémentaires de 150 m de côté. Pour les espaces classés en zone AU, la cartographie des sols gagne en précision (1/10 000), ce qui se traduit par une intégration des notes de qualité agronomique des sols dans des mailles élémentaires de 50 m de côté.

Sur le plan de l'organisation des données, le maillage permet de structurer les données géographiques en les divisant en cellules régulières, ce qui facilite leur gestion et leur analyse. Chaque cellule du maillage peut être associée à des données spécifiques comme des valeurs d'altitude, des données climatiques, des informations sur l'utilisation des terres, des propriétés de sol.

Le maillage fournit une structure régulière qui facilite les traitements et l'analyse spatiale des données en évitant l'écueil statistique de l'effet de taille des unités spatiales hétérogènes (Sanders, 2001). Il permet de calculer des statistiques descriptives objectives et d'identifier des tendances spatiales. Le maillage permet enfin de créer des cartes thématiques avec une résolution spatiale uniforme, ce qui facilite la comparaison visuelle entre différentes régions et la détection de modèles spatiaux.

## 3. L'aléa Érosion hydrique des sols

L'érosion des sols est une cause majeure et croissante de dégradation des sols dans de nombreux pays européens. Le processus d'érosion, qui s'apparente au déplacement de particules du sol sous l'influence du ruissellement, occasionne des dégâts lourds de conséquence pour les cultures, les infrastructures collectives, les biens des personnes et, d'une manière générale, pour l'environnement.

Les préjudices touchent d'abord ceux qui valorisent les sols au quotidien : les exploitants agricoles. Les dégâts concernent les cultures. Cela se traduit par des destructions des semis, par des déchaussements ou par des arrachements de plants. Dans les parties basses des parcelles, le dépôt

de terre conduit au recouvrement des semis ou des jeunes plants enfouis sous la boue. D'autres préjudices moins visibles sont à signaler. Ils se traduisent par une perte de fertilité occasionnée par une réduction de l'épaisseur du sol, une diminution de la réserve utile, une dilution de la matière organique et une perte importante en éléments fertilisants et en produits de traitement.

Les dégâts peuvent affecter également les structures collectives, les biens et les personnes. Les « coulées boueuses » et inondations engendrées par l'érosion détériorent fréquemment des bâtiments, des ouvrages d'art, des routes, des réseaux et des habitations.

Enfin, il faut évoquer la dégradation de la qualité des eaux qui nécessite de recourir à des ouvrages de traitement pour assurer sa potabilité. Les particules de terre érodées entraînent une augmentation de la turbidité des cours d'eau à l'origine de l'altération de la qualité biologique du milieu aquatique. Celle-ci se traduit par la réduction de la pénétration de la lumière dans l'eau et donc la diminution de l'activité photosynthétique, par l'envasement du lit modifiant les équilibres écologiques, par la perturbation de la faune piscicole pouvant entraîner des mortalités importantes des poissons autochtones, par des apports d'éléments nutritifs pouvant favoriser l'eutrophisation et par l'apport d'éléments polluants entraînant des perturbations de la chaîne trophique

Les organismes et structures territoriales ont besoin de disposer d'informations spatialisées pour lutter ou prévenir l'érosion des sols. Il s'agit notamment de circonscrire les secteurs les plus affectés ou susceptibles de l'être afin de formuler des mesures de prévention. A ce sujet, les cartes de risque d'érosion constituent des documents de premier plan. Ceux-ci sont le résultat de la production de modèles d'érosion.

Dans le cadre d'une étude menée pour le compte du Conseil départemental du Calvados au milieu des années 2000, le modèle SCALES (Le Gouée *et al.*, 2010) dont l'acronyme signifie (Spatialisation d'échelle fine de l'Aléa Erosion des Sols) a été développée par Patrick Le Gouée, enseignant-chercheur à l'université de Caen. Ce modèle a été retenu pour l'évaluation de la sensibilité à l'érosion des sols sur la Métropole en complément de la méthode SQUAT et de la méthode MUSE de multifonctionnalité pour apporter une réflexion sur les sensibilités des sols du territoire au regard des problématiques de ruissellement auxquels est confronté le territoire.

### 3.1. Le modèle SCALES

SCALES se distingue des autres méthodes pour plusieurs raisons. Tout d'abord, il s'agit de proposer une cartographie de l'aléa érosion permettant aux acteurs du territoire de disposer d'informations spatialisées au niveau régional tout en ayant un degré de précision élevé à l'échelle locale, ce qui, généralement, est difficilement compatible.

L'évaluation de l'aléa porte sur les zones sources de production de l'érosion identifiées par des unités spatiales élémentaires que sont les parcelles agricoles. Dans de nombreuses régions européennes, la structuration de l'espace agricole est marquée visuellement et physiquement par la juxtaposition de ces parcelles. Chacune de ces unités constitue un système érosif dont l'activation dépend moins de l'environnement proche que des caractéristiques propres à chaque parcelle. En cartographiant l'aléa à cette échelle, il s'agit de fournir aux structures et organismes territoriaux des données pour raisonner la lutte contre le risque d'érosion, non pas à l'échelle du bassin versant, mais directement au niveau des sources potentielles.

### 3.1.1. Éléments de définition

L'érosion hydrique nécessite la présence d'un écoulement de surface des eaux pluviales. Ce ruissellement est lié à un refus d'infiltration de l'eau de pluie dans le sol qui peut s'expliquer tout d'abord par l'incapacité du sol à absorber l'eau de pluie en raison d'une perméabilité insuffisante et/ou l'existence d'événements pluvieux de forte intensité. La perméabilité relève principalement de la structure superficielle et interne du sol qui contrôle l'importance et l'organisation de la porosité grossière (structurale). C'est dans cette porosité que l'eau de pluie va circuler par gravité.

Toute réduction de la porosité structurale entraîne une diminution de la vitesse d'infiltration de l'eau. Elle peut être liée à l'installation d'une croûte de battance lorsque le sol est nu, que les pluies sont agressives et que le sol est fragile. Elle peut relever aussi d'un effondrement de la structure interne par compactage ou sous l'effet du propre poids du sol. Cela concerne plus particulièrement les horizons labourés qui sont initialement très aérés sous l'effet du travail mécanique du sol. Le refus d'infiltration de l'eau dans le sol peut être également la conséquence d'une saturation en eau du sol, d'une croûte de battance due aux pluies ou d'un tassement du sol par les activités agricoles. Celle-ci est induite par la répétition d'évènements pluvieux ou par la présence d'un niveau imperméable dans le sol (horizon argileux) ou au contact du sol (roches, formations superficielles) réduisant fortement le drainage des eaux pluviales.

Le ruissellement s'explique ensuite par la mise en circulation de l'eau non infiltrée. Elle est rendue possible par l'existence d'une pente, même faible, par l'absence d'obstacle à l'écoulement de surface et par une faible détention superficielle (aptitude du sol à stocker l'eau non infiltrée sous forme de flaque). L'écoulement superficiel s'apparente alors à un film d'eau très fin, couvrant la surface du sol, que l'on appelle le ruissellement diffus. Il entraîne un décapage aréolaire du sol caractérisé par l'absence de formes visibles d'érosion. Lorsque la surface ruisselante est suffisamment importante et que la morphologie s'y prête (concavités), le ruissellement se concentre tout en s'organisant en réseau. Sa compétence érosive dépend alors de son débit. L'érosion hydrique s'exprime par des incisions d'échelles centimétriques à métriques que l'on appelle rigoles, ravines et ravins.

La terre érodée est soit faiblement déplacée soit transportée jusqu'au réseau hydrographique. Dans le premier cas, en perdant progressivement de sa compétence par l'absence de pente, de précipitations ou par l'existence d'obstacles, le ruissellement dépose les particules de terre jusqu'à élaborer des couvertures sédimentaires. Dans le second, les éléments fins du sol sont repris par le courant et vont contribuer à renforcer la charge en matière en suspension des cours d'eau.

L'apparition de l'érosion hydrique résulte de quatre facteurs. Il s'agit du climat, du sol, du relief et de l'occupation du sol. Les pluies définissent l'**érosivité pluviale**, c'est-à-dire l'aptitude des précipitations à fragiliser et éroder le sol. L'érosivité dépend de la durée, de l'intensité et de l'occurrence des précipitations.

Les propriétés intrinsèques du sol renvoient à la notion d'**érodibilité** que l'on définit comme l'ensemble des propriétés édaphiques qui favorisent l'érosion des sols. Elles font appel à la texture, l'humidité, la teneur en matière organique et à la nature minéralogique des argiles des sols. Le relief, sous l'effet de la pente et des expressions morphologiques (concavité et convexité topographiques) agit sur la genèse, la nature et l'organisation du ruissellement qui érode le sol. Enfin, l'occupation agricole du sol a un impact fort sur l'état de surface des parcelles d'exploitation et sur la structure du parcellaire qui participent à l'apparition de l'érosion.

L'érosivité, l'érodibilité, le relief et l'occupation du sol définissent la notion d'**érodabilité**, soit la sensibilité d'un sol à se dégrader sous l'emprise des 4 agents évoqués précédemment. **La modélisation des processus érosifs dépend des données d'entrée qui caractérisent chacun des quatre facteurs.**

### 3.1.2. Données mobilisées

#### A propos du climat

Le réseau de postes et stations météorologiques de Météo-France fournit des données sur les précipitations, les températures et l'évapotranspiration (ETP) à différents pas de temps. Le territoire de la MRN dispose de la station météorologique de Rouen-Boos couvrant la Normale climatique de référence 1981-2010 pour toutes les données précédemment citées aux pas de temps mensuel et journalier. Le contexte de plateau de cette station ne permettant pas de prendre en compte les nuances climatiques induites par la topographie de vallée très présente sur le territoire, nous nous sommes appuyés également sur les données du poste de Petiville, situé plus en aval de la vallée de la Seine.

#### Pour les sols.

Les données produites dans le cadre du programme de cartographie des sols de la MRN aux échelles 1/50 000 et 1/10 000 seront exploitées pour déterminer l'érodibilité et l'érosivité pluviale.

#### Concernant le relief

Afin d'estimer de manière optimale les modelés et les pentes des reliefs de plaine alluviale marqués par une certaine planéité ou ceux des reliefs de plateau ondulé organisés autour de versants courts, nous avons opté pour le modèle numérique de terrain (MNT) de l'IGN au pas de 20 m.

#### L'occupation du sol

La caractérisation de cette variable a été menée à partir de 3 sources de données complémentaires : le Registre Parcellaire Graphique (RPG), le zonage du PLUi et les observations de terrain.

Le RPG est un système d'information géographique permettant l'identification des parcelles agricoles, géré par l'Agence de Service et de Paiement. Les données fournissent des informations détaillées sur l'occupation du sol et les structures foncières. Cette source d'informations a permis d'identifier en contexte agricole les cultures principales des parcelles pour la période 2016/2022 afin de prendre en compte toute une grande majorité des assolements pratiqués sur le territoire.

Le zonage du PLUi est un document d'urbanisme qui permet de différencier spatialement les secteurs agricoles des secteurs naturels. Toutefois, dans les faits, certaines zones naturelles sont en réalité des zones agricoles. Il a donc fallu en tenir compte dans l'application du modèle SCALES.

Les observations de terrain sont issues des campagnes de prospection pédologiques. Tous les sondages tarière ont fait l'objet d'une description de profil de sol complétée par une présentation des usages des parcelles investiguées. Un échantillon de ces observations a montré notamment que 20% des parcelles en zone naturelle étaient en réalité cultivées.

### 3.1.3. Les caractéristiques du modèle

#### Notions de base

SCALES est un modèle arborescent qui s'appuie sur l'utilisation d'un système d'information géographique afin de cartographier la sensibilité potentielle des milieux à l'érosion et l'aléa érosion des sols. La sensibilité potentielle des milieux à l'érosion représente la première notion fondamentale du modèle. Cette notion vise à préciser si le milieu est susceptible de générer du ruissellement érosif lorsqu'on prend en compte simultanément les caractéristiques d'érodibilité des sols, d'occupation du sol et de topographie. Il s'agit donc d'un indicateur synthétique.

L'aléa érosion définit la probabilité d'apparition de l'érosion hydrique quand on associe, à la sensibilité potentielle des milieux à l'érosion, l'aptitude des pluies à éroder le sol (érosivité pluviale). Cette aptitude dépend des conditions climatiques et pédoclimatiques. Elle sera plus grande lors des années

pluvieuses et plus faible au cours d'années déficitaires en pluie. **Nous avons donc estimé une érosivité pluviale moyenne à partir de données pluviométriques issues de la Normale climatique de Météo France associée à une période de 30 années entre 1981 et 2010. Par conséquent, l'aléa érosion doit être assimilé à un aléa moyen.**

Les facteurs de l'évaluation de l'aléa érosion des sols (érodibilité des sols, mode d'occupation du sol, topographie et érosivité pluviale) sont représentés par des données d'entrée dont la nature peut être quantitative ou qualitative. Chaque facteur est défini par un ou plusieurs types de données d'entrée. Tous les types sont convertis en informations mesurables qui, à leur tour, vont exprimer des niveaux de pression sur le déclenchement du ruissellement érosif. Certaines données d'entrée sont croisées afin d'obtenir des données combinées générant elles aussi des niveaux de pression. Ce sont les niveaux de pression relevant des données combinées qui conduiront à l'estimation des niveaux d'aléa.

### Nature des données d'entrée

Le choix des données d'entrée (cf. Fig.16) pour caractériser les facteurs de l'évaluation de l'aléa érosion résulte de la prise en compte des positions scientifiques qui font consensus dans la littérature spécialisée.

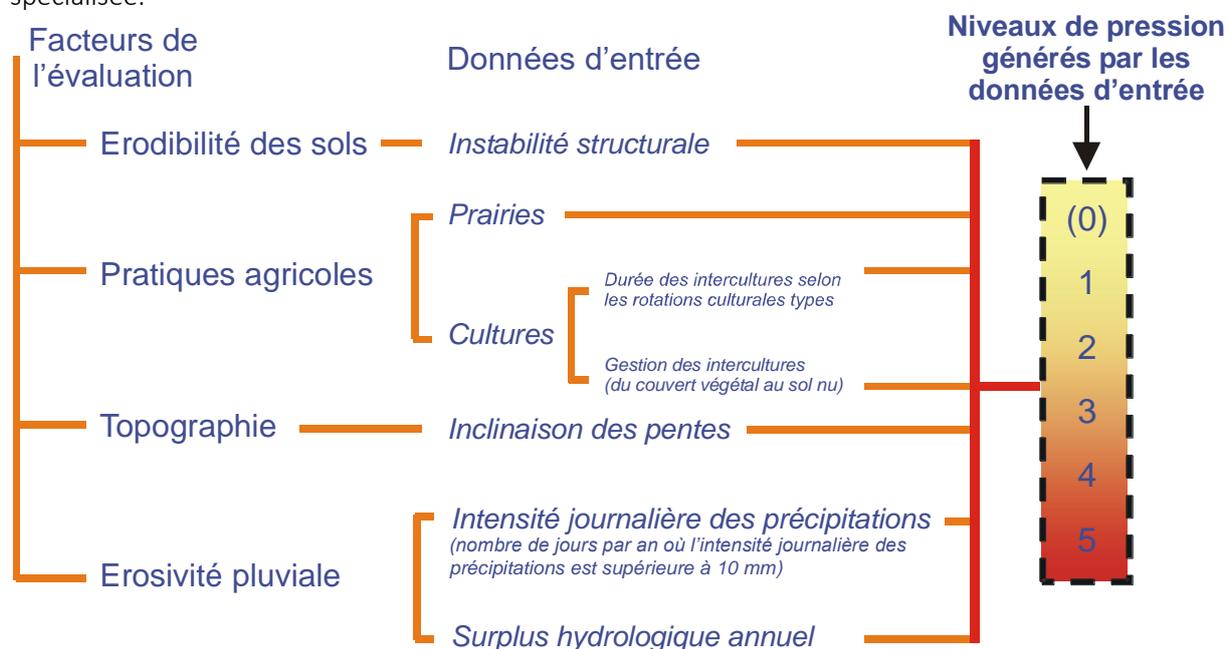


Fig. 16 : Données d'entrée pour caractériser les facteurs de l'évaluation de l'aléa érosion

### Concernant l'érodibilité

Pour estimer l'érodibilité du sol, nous avons retenu comme donnée d'entrée la sensibilité des sols à la battance. Ce facteur renvoie à la sensibilité du sol à la dégradation de sa structure superficielle sous l'action des précipitations. La dégradation par l'eau s'explique par différents mécanismes physiques et physico-chimiques parmi lesquels on peut citer l'éclatement, la désagrégation mécanique, la désagrégation par gonflement différentiel et la dispersion physico-chimique. La désagrégation mécanique sous l'impact des gouttes de pluie constitue, en Normandie et dans les régions soumises à un climat tempéré à influence océanique, le mécanisme principal agissant sur l'installation de la battance.

L'apparition de ce mécanisme nécessite la présence de pluies d'une certaine énergie dans un contexte où les sols sont saturés. La prédominance de la désagrégation mécanique est liée à la diminution de la résistance mécanique des agrégats et du changement de nature des chocs liés au ralentissement

de l'infiltration. L'énergie cinétique des gouttes de pluie n'est plus absorbée mais transformée en force de cisaillement qui provoque détachement et splash. Cette désagrégation entraîne à la fois une diminution importante de la capacité de la terre à laisser infiltrer les eaux pluviales et une réduction significative de la rugosité du sol. Cette double conséquence favorise l'apparition du ruissellement et provoque une érosion diffuse pouvant se transformer en érosion concentrée.

Il existe donc bien une relation entre la désagrégation et l'érodibilité du sol. Toutefois, il faut être conscient que la sensibilité du sol à l'érosion n'est pas toujours corrélée à la notion de battance et a fortiori aux propriétés intrinsèques du sol qui conduisent à ce phénomène. **Dans le cas par exemple de cumuls de pluie importants conjugués à des sols saturés, on observera la mise en place d'un ruissellement sur des sols non battants capable de transporter de gros agrégats ou des éléments grossiers. Ce cas de figure sera intégré au modèle lorsque nous présenterons les données d'entrée relatives au facteur érosivité pluviale.**

La détermination de la sensibilité des horizons de surface à la battance fait appel aux fonctions de pédotransfert. Ce sont des fonctions utilisées en pédologie pour décrire les relations entre les propriétés du sol et les processus de transfert de masse et d'énergie à travers celui-ci. Ces fonctions sont essentielles pour comprendre les processus hydrologiques, biogéochimiques et écologiques dans les sols. En général, les fonctions de pédotransfert prennent en compte différentes propriétés du sol, telles que la texture, la structure, la densité, la porosité, la conductivité hydraulique, la capacité de rétention d'eau, etc., et fournissent des relations mathématiques ou empiriques entre ces propriétés et les processus de transfert, tels que l'infiltration de l'eau ou la rétention des éléments nutritifs. Ces fonctions sont souvent développées à partir de données expérimentales, de mesures sur le terrain et de modèles théoriques.

Ainsi, le niveau de sensibilité des sols à la battance sera défini selon le diagramme textural de l'INRAe (cf. Fig. 17) qui précise pour chaque classe texturale le caractère pas, peu ou très sensible à la battance.

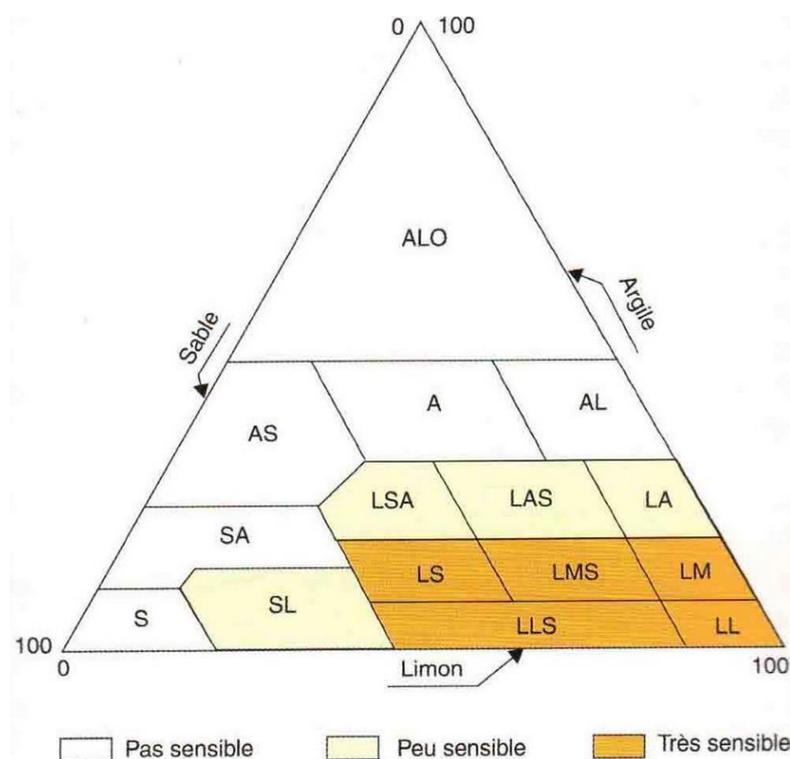


Fig. 17 : Diagramme textural et sensibilité à la battance des sols (source : INRAe)

### Concernant les pratiques agricoles.

L'érosion des sols en domaine tempéré est spécifique des territoires valorisés par l'agriculture. Elle se manifeste lorsque les sols ne sont pas protégés par un couvert végétal pérenne ou suffisamment développé. A ce stade, une première distinction doit être faite entre les surfaces agricoles complètement et durablement végétalisées, à l'image des terres consacrées aux prairies permanentes et aux vergers, et celles qui sont vouées aux cultures. Dans le premier cas, l'érosion hydrique demeure nulle ou très anecdotique. Dans le second, le risque de perte en terre est étroitement associé aux modalités de conduite technique des parcelles et à leur temporalité.

Le choix de la mise en culture ou en herbe des terres agricoles et les décisions de conduite techniques des parcelles cultivées s'effectuent dans le cadre de logiques de gestion des exploitations agricoles calées sur plusieurs années. L'évaluation des pressions générées par l'agriculture sur l'aléa érosion répond à ces logiques. C'est la raison pour laquelle il est préférable de parler de « pratiques agricoles » plutôt que d'« occupation du sol » : la première expression situe l'impact de l'agriculture à l'échelle pluriannuelle, la seconde fait davantage référence aux types de couverts végétaux (prairie, cultures céréalières, cultures fourragères) à un instant T.

Tout comme nous l'avons explicité à propos de l'érosivité pluviale, le rôle des pratiques agricoles sur l'érosion est finalement apprécié sur la base d'un niveau de pression moyen caractérisant l'impact érosif global de la conduite technique des terres dans les cycles agricoles. L'aléa érosion est donc un indicateur de pertes en terre dont la portée se situe dans un cadre temporel d'échelle pluriannuelle.

Le rôle des pratiques agricoles dans la modélisation de l'aléa érosion est déterminé à partir de la présence pérenne ou annuelle du couvert végétal. Une première distinction est réalisée entre les surfaces toujours végétalisées (prairie permanente et vergers) et les surfaces mises régulièrement en culture. Dans le second cas, la reconnaissance des types de culture permet de disposer d'informations à propos de la durée nécessaire au recouvrement du sol par les cultures. **Cette caractéristique est fondamentale pour l'application de SCALES car elle fait état de la période pendant laquelle le sol, pas ou peu végétalisé, subit l'action érosive des pluies.**

Pour cela, nous avons utilisé les travaux d'Arvalis (cf. Fig.18) mettant en relation les principales cultures régionales avec le temps imparti pour obtenir un taux de recouvrement du sol de 100%. S'il est souvent recommandé d'atteindre un taux de couverture minimale du sol par les cultures d'environ 70 à 80 % pour réduire de manière significative le risque d'érosion hydrique, nous avons fait le choix de retenir comme seuil critique un taux de recouvrement à 30%, taux considéré comme insuffisant pour prévenir efficacement l'érosion hydrique.

On note sur le document ci-dessous que la durée nécessaire pour dépasser ce taux varie considérablement entre la moutarde (moins de 15 jours) et les céréales (60 jours). **Or, plus la durée est importante plus le sol est exposé à l'érosivité pluviale. En mettant en relation les types de culture avec la durée exigée pour atteindre le taux de recouvrement à 30%, nous pouvons appréhender l'impact des pratiques agricoles sur l'érodabilité des milieux. Les données du RPG pour la période 2016-2022 permet d'estimer une durée moyennée sur 7 ans, incluant de ce fait les rotations culturales les plus longues.**

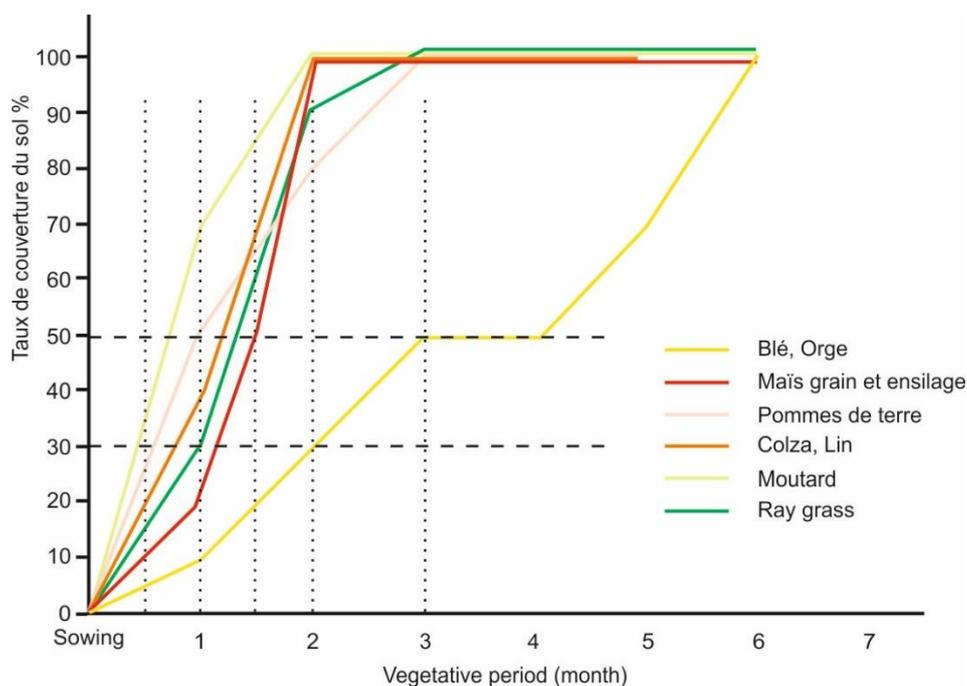


Fig. 18 : Taux de recouvrement du sol pour les cultures principales (source : Arvalis)

#### Concernant la topographie.

Le rôle de la topographie dans l'évaluation de l'aléa érosion des sols est exprimé à travers la sélection d'un seul type de données d'entrée à savoir l'inclinaison de la pente. Les possibilités de mise en mouvement des eaux non infiltrées dépendent de la déclivité en tout point de l'espace. Elles augmentent rapidement dès que les pentes s'affirment. Il en est de même pour l'action érosive des eaux de ruissellement.

Sur pentes douces à modérées (0-5%), l'eau de pluie a plus de temps pour s'infiltrer dans le sol, réduisant le ruissellement et le potentiel d'érosion. Dans le cas de pentes modérées à fortes (5-15 %), le ruissellement devient plus rapide et le risque d'érosion hydrique augmente. Au-delà de 15%, l'eau de pluie a tendance à se transformer rapidement en ruissellement, entraînant des taux d'érosion hydrique élevés. Ces zones peuvent être extrêmement vulnérables à l'érosion.

#### Concernant l'érosivité pluviale.

La pluie est le facteur principal de l'érosion hydrique. Sa capacité à dégrader les sols dépend de l'intensité pluviale, des volumes d'eau précipités et de la réponse hydrologique du sol en réaction aux pluies. Ces paramètres nous ont conduits à proposer deux types de données d'entrée. Le premier type définit l'aptitude des pluies à éroder la terre sur la base de leur intensité. **Parmi les indicateurs utilisés, nous avons retenu celui qui s'appuie sur le nombre de jours par an pendant lesquels l'intensité journalière des précipitations est égale ou supérieure à 10 mm. L'acquisition de ce type de données ne présente pas d'obstacle particulier dans la mesure où Météo France collecte ces informations.**

Le second type de données résulte de la confrontation des cumuls de pluie dans l'année avec la réponse hydrologique des sols. Il fait référence à la notion de surplus hydrologiques et s'obtient en appliquant la méthode des bilans hydriques. Les surplus s'apparentent à des volumes d'eau disponibles à l'écoulement soit sous forme de drainage soit sous forme de ruissellement. Ils résultent de la prise en compte simultanée de la demande évapotranspiratoire potentielle (ETP), des précipitations et du réservoir utile des sols.

Il n'est pas possible de distinguer ce qui revient au drainage et au ruissellement. Cependant, on peut considérer que le risque de ruissellement érosif s'accroît lorsque les surplus hydrologiques augmentent. Ceux-ci sont calculés à l'échelle mensuelle puis cumulés à l'échelle de la période hydrologiquement active (octobre à mars). Il s'agit de valeurs moyennes issues de la Normale climatique 1981-2010. La principale difficulté rencontrée dans l'obtention de ce type de données provient des moyens mis en œuvre pour disposer d'informations fiables et précises à propos des réservoirs utiles des sols. Cette difficulté est levée dans la mesure où il a été décidé de cartographier les sols et leurs propriétés sur le territoire de la MRN.

### 3.1.4. Les étapes de la modélisation

La première étape a pour objectif de retranscrire l'ensemble des données d'entrée en niveaux de pression érosif. **6 niveaux de pression ont été définis, allant de 0 à 5. Le niveau 0 indique l'absence de pression, le niveau 5 renvoie à un niveau de pression très élevé.**

Certains types de données d'entrée ne comptent que 5 niveaux. Dans ce cas, c'est le niveau 0 qui n'est pas proposé. Il en est ainsi pour l'intensité journalière des précipitations et les surplus hydrologiques annuels. Quelles que soient leurs caractéristiques, ces types de données génèrent des situations favorables au déclenchement de l'érosion des sols.

Les niveaux 0 ont été affectés aux types de données d'entrée « Prairie », « Pentas » et « Battance ». La présence d'un couvert végétal permanent tel que les herbages protège toujours le sol d'un risque d'érosion même s'il n'est pas rare d'observer du ruissellement sur des surfaces toujours en herbe. Au sujet des pentes, le niveau 0 correspond à la topographie dont la surface atteste une déclivité inférieure à 1%. Dans cette situation, la pente ne permet pas à l'eau non infiltrée de se mettre en mouvement, ce qui écarte toute possibilité d'érosion hydrique. Pour la battance, certaines textures demeurent insensibles à l'érosivité pluviale en raison d'un matériel sédimentaire cohésif (textures argileuses) ou très grossier et filtrant (texture sableuse).

La deuxième étape consiste à combiner les niveaux de pression des données d'entrée sur la base d'une démarche additive (cf. Fig.19).

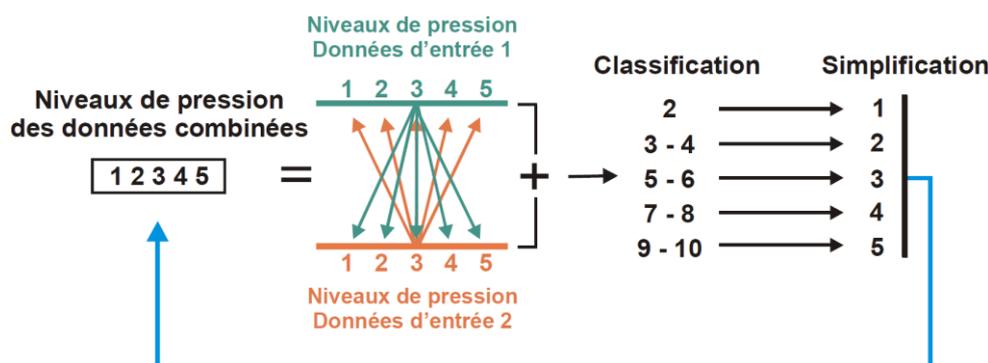


Fig. 19 : Combinaison des données d'entrée par démarche additive

Entre deux types de données d'entrée, toutes les combinaisons sont envisageables. Les sommations peuvent être comprises alors dans un intervalle allant de 0 à 10. Ces valeurs sont ensuite intégrées dans les classes suivantes :  $\leq 2$ , 3-4, 5-6, 7-8 et 9-10. Chaque classe est retranscrite en une valeur simple équivalant à un niveau combiné de pression érosive (1 pour la classe  $\leq 2$  jusqu'à 5 pour la classe 9-10). Les niveaux combinés ont la possibilité d'être à nouveau croisés avec des niveaux de pression d'autres données d'entrée ou avec d'autres niveaux combinés. Dans tous les cas, la procédure de combinaison et de simplification des niveaux de pression demeure la même.

La troisième étape conduit à l'estimation des niveaux d'aléa. Elle suppose de prendre connaissance de la structure du modèle (cf. Fig.20). **SCALES est un modèle arborescent, c'est-à-dire qu'il s'appuie sur une hiérarchisation des données d'entrée selon leur importance dans la genèse du ruissellement érosif.** Les arguments qui plaident pour cette structuration sont analogues à ceux que nous avons avancés à propos du choix des types de données d'entrée.

Ainsi, on peut noter par exemple que le type « Taux de recouvrement » a moins d'influence sur le déclenchement du ruissellement érosif que le type « Pentes » qui, lui-même, compte moins que le type « Battance ».

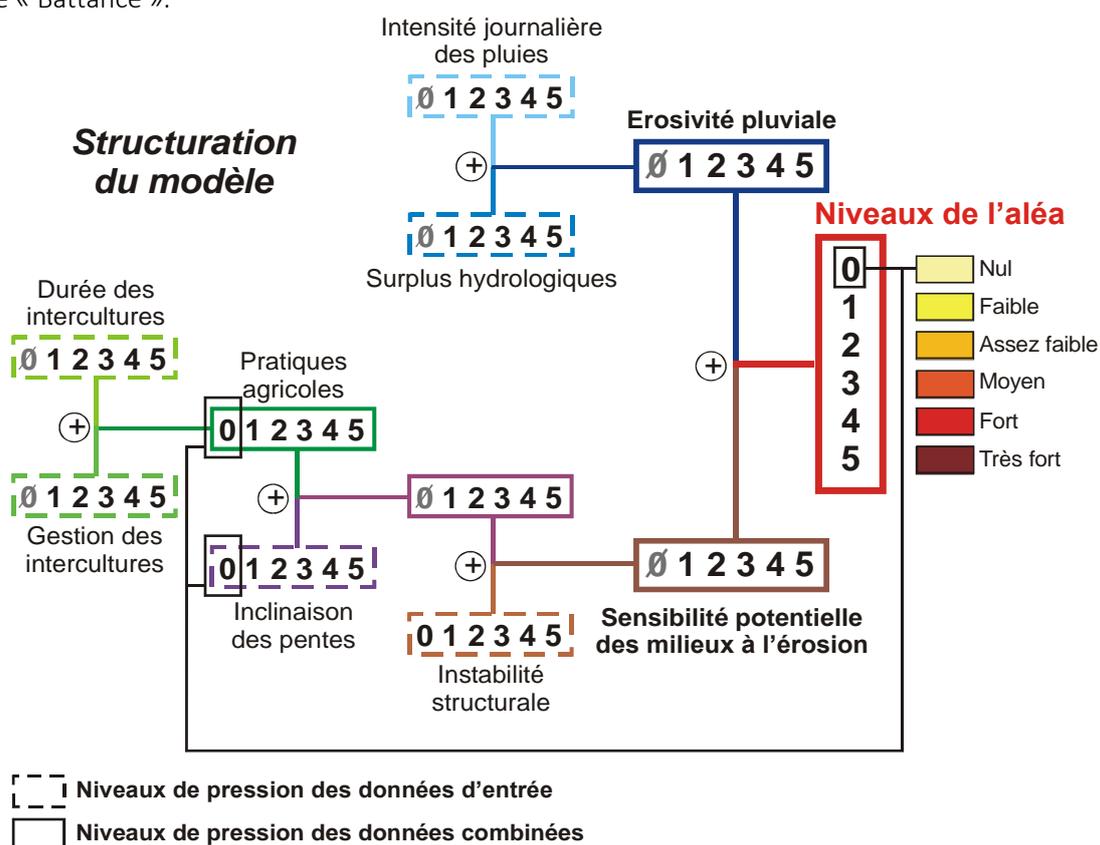


Fig. 20 : Structuration du modèle SCALES

Si cette structuration n'abonde pas dans le sens d'une pondération des types à partir de coefficients, le classement des données d'entrée associé à la démarche additive contribue à soutenir cette idée. Cette pondération s'opère chaque fois que l'on passe d'une procédure de combinaison à une autre. Le poids des données d'entrée est toujours divisé par 2 lors de la première combinaison puis, de nouveau par 2, lors de la suivante. Selon ce mode de fonctionnement, on notera que l'impact des niveaux de pression des données d'entrée sur les valeurs de l'aléa érosion décroît significativement à mesure que les types de données descendent dans la hiérarchie proposée. Ainsi, l'aléa érosion dépendra davantage de la battance des sols que des pratiques agricoles.

L'application du modèle SCALES prévoit des cas particuliers qui échappent au principe général de fonctionnement. Le niveau 0 des données relatives aux pratiques agricoles, qui évoque les surfaces toujours en herbe et les vergers, et le niveau 0 du type « Pentes », qui caractérise les pentes inférieures à 1%, sont exclus automatiquement de la chaîne de traitements. Ces niveaux sont directement convertis en niveau 0 de l'aléa érosion. Cette conversion n'impose pas aux surfaces agricoles de valider ces deux conditions.

### Cas particulier de la modélisation SCALES en Zone Naturelle

Nous n'avons pas prévu de cartographier l'aléa érosion hydrique des sols dans les secteurs classés en Zone Naturelle en raison des modalités d'occupation du sol qui leur sont associées (prairie, bois, forêt) et qui sortent de la chaîne de traitement. Toutefois, nous avons indiqué la présence non négligeable des cultures dans ces Zones Naturelles lors des prospections pédologiques. Nous avons donc décidé d'appliquer SCALES en excluant de la modélisation le facteur « Pratiques agricoles » puisque nous n'avons pas de visibilité sur le caractère naturel ou agricole (cultures) de toutes les surfaces répertoriées en Zone Naturelle.

Ainsi, les données en sortie ne seront pas retranscrites sous la forme de niveaux d'aléa érosion mais de niveaux de prédisposition à l'aléa érosion.

#### 3.1.5. Classification des données et conversion des classes en niveaux de pression érosive.

Les classes de pression érosive liées à la battance s'appuient sur le diagramme textural de l'INRAE qui distingue les textures pas, peu et très sensibles à la battance. Ces 3 classes de sensibilités sont converties respectivement en niveaux de sensibilité à la battance 0, 2, et 5 qui sont autant de niveaux de pression érosive (0 = pression érosive nulle, 2 = assez faible et 5 = pression très forte).

Concernant la **durée nécessaire pour atteindre un taux de recouvrement des cultures de 30%**, nous avons opté pour une classification en **4 classes de durée** : < 0.5 mois, [0.5 ; 1 mois[, [1 ; 1.5 mois[, [1.5 ; 2 mois]. Ces 4 classes sont retranscrites en niveaux de pression 1, 2, 3 et 4. Les surfaces agricoles vouées à des couverts végétaux pérennes sont associées au niveau de pression 0.

Les pentes ont été intégrées dans 6 classes dont les limites émanent à la fois de traitements statistiques adaptés (discretisation selon la méthode de la progression géométrique) et de bornes issues de la littérature. Les classes de pentes sont les suivantes : [0 ; 1%[, [1 ; 2%[, [2 ; 5%[, [5 ; 10%[, [10 ; 15%[, >=15%. Celle-ci correspondent respectivement aux niveaux de pression 0, 1, 2, 3, 4, 5.

Le nombre moyen de jours marqués par un cumul de pluie supérieur à 10 mm a été déterminé sur la période dégageant des surplus hydrologiques (octobre à mars). Les valeurs ont été intégrées à des classes dont les bornes ont été déterminées dans le cadre d'une étude analogue menée à l'échelle du Calvados, département dont les nuances climatiques sont comparables à celles des autres territoires soumis à un climat tempéré à influence océanique. Les classes sont les suivantes : < 20 jours; [20-25]; [25-32]; [32-40]; >=40 jours. Elles expriment respectivement les niveaux de pression érosive 1, 2, 3, 4, 5.

Concernant les surplus hydrologiques, nous avons repris la classification régionale définie dans le cadre des travaux précédemment cités pour le Calvados. Là aussi, la validité des limites de classes dépasse le simple cadre régional normand. On obtient ainsi, pour les surplus hydrologiques moyens calculés sur la période Octobre-Mars, les classes suivantes : <150 mm; [150-250 mm]; [250-350 mm]; [350-450 mm]; >=450 mm. Elles renvoient aux niveaux de pression 1, 2, 3, 4, 5.

Le tableau ci-dessous (cf. Fig.21) reprend de manière synthétique la classification de chaque donnée d'entrée du modèle et les niveaux de pression érosive associés.

### Sensibilité potentielle des milieux

Taux de recouvrement ≤30%		Pentes		Sensibilité à la battance	
Nb mois	Niv. de pression	%	Niv. de pression	Texture	Niv. de pression
Couvert annuel	0	< 1	0	Autres	0
< 0,5	1	[1 ; 2[	1		
[0,5 ; 1[	2	[2 ; 5[	2	LA/LAS/LSA/SL	2
[1 ; 1,5[	3	[5 ; 10[	3		
[1,5 ; 2]	4	[10; 15[	4		
		> 15	5	LL/LLS/LM/LMS/LS	5

### Érosivité pluviale

Intensité journalière des pluies		Surplus hydrologiques	
NB IJ10	Niv. de pression	mm	Niv. de pression
< 20	1	< 150	1
[20 ; 25[	2	[150 ; 250[	2
[25 ; 32[	3	[250 ; 350[	3
[32 ; 40[	4	[350 ; 450[	4
>= 40	5	>= 450	5

Signification des textures : LA (limono-argileux), LAS (limono-argilo-sableux), LSA (limono-sablo-argileux), SL (limono-sableux), LL (limon léger), LLS (limon léger sableux), LM (limon moyen), LMS (limon moyen sableux), LS (limono-sableux).

Fig. 21 : Classification des données d'entrée du modèle et niveaux de pression érosive associés.

## 3.2. Les Unités Spatiales d'Intégration des données SCALES

Nous avons fait le choix de représenter les données de l'aléa érosion hydrique des sols sur la base d'un carroyage du territoire dont la maille carrée de 150 m de côté correspond au niveau de précision spatiale de la base de données Sol au 1/50 000. La cartographie par maillage présente de nombreux avantages. Sur le plan de l'organisation des données, le maillage permet de structurer les données géographiques en les divisant en cellules régulières, ce qui facilite leur gestion et leur analyse. Chaque cellule du maillage peut être associée à des données spécifiques comme des valeurs d'altitude, des données climatiques, des informations sur l'utilisation des terres, des propriétés de sol.

Le maillage fournit une structure régulière qui facilite les traitements et l'analyse spatiale des données en évitant l'écueil statistique de l'effet de taille des unités spatiales hétérogènes. Il permet de calculer des statistiques descriptives objectives et d'identifier des tendances spatiales. Le maillage permet enfin de créer des cartes thématiques avec une résolution spatiale uniforme, ce qui facilite la comparaison visuelle entre différentes régions et la détection de modèles spatiaux.

## 4. La multifonctionnalité des sols

### 4.1. Le modèle MUSE

La loi Climat et Résilience de 2021 met en avant le rôle de l'artificialisation sur l'altération de toute ou partie des fonctions du sol à savoir ses fonctions biologiques, hydriques et climatiques ainsi que son potentiel agronomique. Or, ces fonctions sous-tendent des services écosystémiques dont les sociétés sont tributaires pour pouvoir assurer à la fois leur développement et leur bien-être. Cette loi, portée par le principe du Zéro Artificialisation Nette (ZAN), impose dans un premier aux collectivités de diviser par deux la consommation des espaces naturels, agricoles et forestiers entre 2021 et 2030 au regard de la décennie précédente. Elle leur demandera à partir de 2031 de compenser les fonctions des sols qui feront l'objet d'une artificialisation, nouvelle terminologie allant au-delà de la consommation des ENAF, prenant en compte toute artificialisation de sol dès 2 500 m<sup>2</sup>, sur la base de la nomenclature fixée par le décret du 27 novembre 2023. Cela implique de doter les documents d'urbanisme

d'informations précises sur les fonctions des sols. C'est dans ce contexte que l'outil MUSE a été développé et testé auprès de 3 métropoles : Aix-Marseille Provence, Nantes et Châteauroux.

Si cet outil répond aux objectifs de planification à l'échelle du SRADET, il trouve sa limite dans une application plus fine (SCOT, PLUi) en raison de données lacunaires sur les sols ayant une précision satisfaisante. C'est pourquoi la Métropole Rouen Normandie s'est mobilisée pour caractériser à l'échelle locale la ressource en Sol et sa multifonctionnalité selon MUSE pour mieux orienter son objectif de transition sociale et écologique dans le cadre de l'élaboration du SCOT-AEC et la révision de son PLUi. Cette déclinaison de l'outil MUSE sur le territoire de la MRN est une première en Normandie et préfigure sur le plan national une implication croissante des collectivités dans l'acquisition de ce type de données. L'outil MUSE s'articule autour de l'évaluation de certaines fonctions dont les approches diffèrent selon le niveau d'anthropisation des milieux.

#### 4.1.1. Les choix des fonctions pour caractériser la multifonctionnalité des sols en milieu faiblement anthropisé (zones A, N et AU)

Le choix des fonctions écologiques permettant à l'écosystème de fonctionner, sans prendre en compte les usages qu'en fait l'homme et les enjeux/contraintes liées à ces usages, est retenu par la méthode MUSE au détriment des fonctions anthropiques jugées trop limitatives car anthropocentrées. Cependant, la distinction entre ces deux notions reste complexe, certaines fonctions qui bénéficient aux écosystèmes bénéficient aussi à l'Homme (exemple : la fonction régulation du cycle de l'eau, la source de biomasse). De plus, les fonctions dites évolutives dans le temps ou dynamiques ont été mises de côté car complexes à appréhender, à analyser et à estimer (exemple : la fonction stockage, filtration et transformation des nutriments).

MUSE ne traite pas directement des services écosystémiques ou services rendus à l'homme mais par l'évaluation des fonctions du sol, les services qu'il rend transparaissent indirectement. L'objectif de cette partie de l'étude est double :

- sensibiliser les acteurs des territoires au sol en tant que ressource naturelle finie et de ne plus seulement le considérer comme un support de l'aménagement,
- orienter les choix d'urbanisme tout en préservant ce capital pour les générations futures.

Les quatre fonctions retenues afin de caractériser la multifonctionnalité de sol sont les suivantes : fonction source de biomasse, fonction régulation du cycle de l'eau, fonction réservoir de carbone, fonction réservoir de biodiversité du sol.

La biomasse (ensemble de la matière organique d'origine végétale ou animale) est indispensable aux sociétés humaines dans la mesure où elle est à la base de notre alimentation, fournit de la matière première et reste une source d'énergie et de chaleur largement utilisée. Au-delà de son importance pour l'Homme, elle est également une pièce fondamentale du fonctionnement des milieux naturels offrant abris et aliments à la biosphère. La capacité d'un sol à produire de la biomasse est donc une fonction essentielle à prendre en compte pour déterminer la multifonctionnalité d'un sol. Il s'agit ici d'évaluer le potentiel agronomique des sols.

Le sol est un lieu de transit dans le cycle de l'eau. Certains sols, par leur nature, sont plus aptes que d'autres à réguler ce cycle permettant ainsi une meilleure infiltration des eaux de ruissellement, limitant le risque inondation, et procurant des îlots de fraîcheur lors des phénomènes caniculaires qui semblent voués à se multiplier dans les années à venir.

**A l'échelle globale, les sols et les forêts stockent, sous forme de biomasse vivante ou morte, 3 à 4 fois plus de carbone que l'atmosphère** (Derrien *et al.*, 2016). Ce carbone est issu de la dégradation des apports végétaux et de la pédofaune. Toute variation négative ou positive de ces stocks, peut jouer

un rôle face au changement climatique en influant sur les émissions de gaz à effet de serre ou en facilitant le stockage de l'eau et la vie végétale et permettant d'abaisser les températures localement via le phénomène d'évapotranspiration. Évaluer la fonction de réservoir de carbone se révèle donc très intéressant.

Le sol constitue un réservoir important de biodiversité (Lemanceau, 2020). À l'échelle mondiale, il contiendrait plus de 25 % de la biodiversité connue. Cette biodiversité est indispensable au bon fonctionnement du sol à travers toutes les fonctions qu'elle rend : recyclage de la matière organique et des nutriments, création de conditions favorables à la vie des autres espèces, limitation de la présence de pathogènes. Un indice qualifiant la biodiversité présente dans les sols, se révèle donc être un bon indice à prendre en compte dans la détermination de la multifonctionnalité d'un sol.

#### 4.1.2. L'évaluation des 4 fonctions et de la multifonctionnalité des sols en milieu faiblement anthropisé (zones A, N et AU)

Les 4 fonctions sont évaluées à partir de données de terrain et de données statistiques. Les fonctions source de biomasse et régulation du cycle de l'eau nécessitent de disposer de bases de données Sol émanant d'un travail de collecte d'informations de terrain alors que les fonctions réservoir de carbone et réservoir de biodiversité du sol relèvent de données issues de moyennes régionales ou nationales agrégées par type d'occupation du sol. **A noter que les données de terrain mobilisées pour déterminer les deux premières fonctions proviennent du programme d'inventaire et de cartographie des sols présenté précédemment et que les données statistiques relatives aux deux autres fonctions ont été enrichies par d'autres sources d'informations précisant les modalités d'occupation du sol (RPG, MOS, photographies aériennes, observations de terrain lors des campagnes de sondages tarière).**

##### L'évaluation de la fonction de biomasse

La représentation de cette fonction s'appuie sur le calcul d'un indicateur : le potentiel agronomique d'un sol. L'outil MUSE présente les paramètres pédologiques permettant de caractériser la fonction de production : il s'agit du réservoir utile (RU), de la texture de l'horizon de surface, du pH à deux profondeurs, de la profondeur totale du sol et de la proportion d'éléments grossiers. Ces critères sont non hiérarchisés et sont chacun répartis en classes. Chaque classe est notée de 1 à 5. L'addition des notes de chaque critère permet d'attribuer une classe de potentiel agronomique au sol concerné. Cette classification prend en compte a posteriori des contraintes supplémentaires qui pourraient s'appliquer sur le sol : l'hydromorphie, la pente, la salinité et la contamination.

Nous avons fait le choix de ne pas utiliser cette modélisation pour deux raisons majeures. Dans la BDD Sol de la MRN, nous ne disposons pas des données de pH en tout point du territoire en raison du coût d'analyse que cela aurait engendré. La seconde raison est plus fondamentale car cette modélisation ne tient pas compte d'un facteur pédo-climatique essentiel : le déficit hydrique qui témoigne du niveau de contrainte agronomique induit par le manque d'eau utile dans les sols.

C'est pourquoi nous avons remobilisé le modèle SQUAT en l'adaptant légèrement pour passer de 6 classes de notation à 5 classes comme le propose l'indicateur MUSE. Les classes de notation 1 et 2 de SQUAT ont été regroupées pour être assimilées à la classe 1 de MUSE (cf. Fig.22).

Classification SQUAT		Classification MUSE	
Valeurs	Qualificatifs	Valeurs	Qualificatifs
1	Très faible	1	Faible
2	Faible	2	Assez Faible
3	Assez faible	3	Moyenne
4	Assez élevée	4	Assez élevée
5	Élevée	5	Élevée
6	Très élevée		

Fig. 22 : Correspondance entre les classes SQUAT et les classes de l'indicateur Potentiel de production de biomasse de MUSE

### L'évaluation de la fonction régulation du cycle de l'eau

Le sol est un lieu de transit dans le cycle de l'eau. Certains sols, par leur nature, sont plus aptes que d'autres à réguler ce cycle permettant ainsi une meilleure infiltration des eaux de ruissellement, limitant le risque inondation, et procurant des îlots de fraîcheur lors des phénomènes caniculaires qui semblent voués à se multiplier dans les années à venir. L'indicateur choisi ici afin de traduire la fonction d'un sol à réguler le cycle de l'eau fait référence au potentiel de ce sol à infiltrer l'eau.

Le potentiel d'infiltration des sols dépend de plusieurs critères intrinsèques au sol : la présence d'un niveau imperméable, la texture, le degré d'hydromorphie et la perméabilité du sol. Critères auxquels il faut ajouter la déclivité des versants qui est, elle, extrinsèque au sol. Nous présentons ci-après le détail du calcul du potentiel d'infiltration.

- Présence d'un plancher imperméable.

Le potentiel d'infiltration dépend de la présence en profondeur d'un plancher imperméable, c'est-à-dire d'un niveau où l'eau est bloquée et ne peut plus s'infiltrer en profondeur. Sa valeur (note) est établie selon le tableau suivant (cf. Fig.23) :

Notes		Profondeur en cm	Profondeur en cm
0	<	25	
1	entre	25	50
2	entre	50	100
3	>	100	

Fig. 23 : Potentiel d'infiltration et profondeur d'un plancher imperméable

- La texture

C'est la proportion entre les petites particules, les argiles, les particules de taille moyenne, les limons, et particules de grande taille, les sables (dont le diamètre reste tout de même inférieur à 2 mm). Les textures sont regroupées en classes : sol argileux, limono-sableux...Elles donnent aux sols des propriétés agronomiques différentes vis-à-vis de la rétention de l'eau, de la disponibilité des éléments nutritifs, de l'aération du sol qui sont des paramètres majeurs pour le développement des plantes. Le potentiel d'infiltration dépend aussi du type de texture. Une note de potentiel d'infiltration est délivrée pour chaque texture selon le tableau ci-dessous (cf. Fig.24).

Notes		Texture	Classes de l'Aisne	Classe GEPPA
0	=	Argileuse	ALo, A, AL	AA, A, AI
1	=	Limoneuse	LL, LM, LMS, LLS, LS	La, L, Ls
2	=	Equilibrée	LSA, LAS, AS, LA	LSa, Sa, AS, LAS, As, Als
3	=	Sableuse	S, SA	Sa, S, SI

Fig. 24 : Potentiel d'infiltration et textures

- La perméabilité

La capacité d'infiltration du sol, ou aptitude du sol à se laisser traverser ou circuler par l'eau, dépend essentiellement de la texture et de la structure du sol. Plus le sol est perméable plus l'eau s'infiltré. Cette donnée peut être utilisée pour déterminer les possibilités et les modalités de l'irrigation et du drainage sur les sols travaillés. Pour les hydrologues, il s'agit essentiellement d'évaluer la capacité d'infiltration d'un sol travaillé ou naturel vis-à-vis de l'eau de pluie et, éventuellement, d'évaluer les possibilités de déplacement de l'eau dans le sol vers les nappes phréatiques.

Cette donnée peut être acquise par des méthodes de caractérisation *in situ* qui ne peuvent pas être mises systématiquement en place sur l'ensemble du territoire. Il a donc fallu recourir à des méthodes d'estimation par des fonctions de pédotransfert. La méthode utilisée pour estimer la perméabilité du sol est la fonction de pédotransfert de Toth (Toth *et al.*, 2015). Elle est basée sur la régression linéaire combinant analyse granulométrique, pH et CEC (cf. Fig.25).

Pour l'horizon de surface :

$$\text{Log}_{10}Ks = 0,40220 + 0,26122 * \text{pH} + 0,44565 - 0,02329 * A - 0,01265 * L - 0,01038 * \text{CEC}$$

Pour les horizons de profondeur :

$$\text{Log}_{10}Ks = 0,40220 + 0,26122 * \text{pH} - 0,02329 * A - 0,01265 * L - 0,01038 * \text{CEC}$$

Où  $\text{Log}_{10}Ks$  est la perméabilité exprimée en  $\text{Log}_{10} \text{ cm. J}^{-1}$ .

Fig. 25 : Fonction de pédotransfert de Toth

La valeur en  $\text{log}_{10}Ks$  est transformée en  $Ks$ . Le calcul par UCS est effectué par une moyenne harmonique des conductivités des horizons constituant le profil, pondérée par l'épaisseur de ces horizons (cf. Fig.26).

Un exemple :

		Epaisseur (m)	Proportion des horizons dans le profil	$\text{Log}_{10} Ks$ (cm/j)	$Ks$ (cm/j)	$Ks$ (m.s-1)
Horizon 1	0-30 cm	0,3	0,6	0,3	1,995	2,31E-07
Horizon 2	30-50 cm	0,2	0,4	2	100	1,16E-05
Epaisseur totale		0,5				

Fig. 26 : Exemple de valeurs issues de la fonction de pédotransfert de Toth

La perméabilité est représentée sous forme de classes auxquelles on affecte une note de potentiel d'infiltration (cf. Fig.27).

Notes	Perméabilité (KS cm/j)	Qualificatifs
0	< 0,86	Sol imperméable
1	0.86 < et ≤ 8.6	Sol peu perméable
2	8.6 < et ≤ 86	Sol modérément perméable
3	> 86	Sol perméable à très perméable

Fig. 27 : Potentiel d'infiltration et perméabilité selon la fonction de pédotransfert de Toth

- L'hydromorphie

L'engorgement ou saturation par l'eau se définit par l'occupation de la totalité de la porosité d'un horizon par l'eau. Lorsqu'il est engorgé, un horizon est à son humidité maximale. L'hydromorphie est la manifestation morphologique de l'engorgement. Elle se constate par l'observation de taches, de colorations ou de décolorations dans un horizon ou un solum. Ce phénomène résulte de la dynamique du fer et du manganèse (qui sont tous deux des éléments colorés) en milieu alternativement réducteur puis réoxydé.

La conséquence est que l'hydromorphie est dans la plupart des cas observable. Les traits rédoxiques résultent d'engorgements temporaires avec pour conséquence principale des alternances d'oxydation et de réduction. Le fer réduit (soluble), présent dans le sol, migre sur quelques millimètres ou quelques centimètres puis re-précipite sous forme de taches ou accumulations de rouille, nodules ou films bruns ou noirs... Les zones appauvries en fer se décolorent (blanchiment, teintes livides) et demeurent alors visibles même en période sèche ou quand le sol a été drainé. Les traits réductiques résultent d'engorgements permanents ou quasi permanents ce qui induit un manque d'oxygène dans le sol, créant un milieu réducteur riche en fer ferreux Fe<sup>++</sup>.

Les sols sont définis en fonction de leur degré d'hydromorphie (correspondance aux classes GEPPA) :

Sain (aucun signe d'hydromorphie)

Hydromorphie entre 50 et 80 cm (classe III)

Hydromorphie entre 25 et 50 cm (classe IV)

Hydromorphie entre 0 et 25 cm (classe V et VI (- VId))

Hydromorphie dès la surface avec un horizon réduit avant 50 cm (classe VI d)

Le potentiel d'infiltration lié à l'hydromorphie est finalement noté de 0 à 3 selon son intensité (cf. Fig.28).

HYDROMORPHIE	Drainage naturel Code Donesol	Notes
AUTRE	< 4	3
Hydromorphie entre 50 et 80 cm (classe III)	=4	1
Hydromorphie entre 25 et 50 cm (classe IV)	=4	1
Hydromorphie entre 0 et 25 cm (classe V et VI (- VI <sub>d</sub> ))	> 4	0
Hydromorphie dès la surface avec un horizon réduit avant 50 cm VI <sub>d</sub>	> 4	0
HISTOSOL		0

Fig. 28 : Potentiel d'infiltration et hydromorphie des sols

- Contrainte supplémentaire rédhibitoire : la pente

La pente est indépendante de la nature du sol, elle n'est donc pas dérivée des bases de données sol mais des bases de données topographiques (modèles numériques de terrain). Elle a un impact fort sur l'infiltration de l'eau dans le sol. Mécaniquement, plus la pente est forte, plus l'eau de pluie aura tendance à ruisseler en surface et moindre sera l'infiltration de l'eau dans le sol. C'est donc une contrainte forte.

Le potentiel d'infiltration tient compte de ce facteur extrinsèque aux sols composé de 4 classes de pente associées à une note de potentiel (cf. Fig.29).

Déclivité du versant %	Notes
0 à 2 %	3
2 à 5 %	2
5 à 10 %	1
> 10	0

Fig. 29 : Potentiel d'infiltration et déclivité des versants

- Note finale du potentiel d'infiltration

La note finale du potentiel d'infiltration résulte d'une sommation puis d'une discrétisation des notes des 5 paramètres (cf. Fig.30).

Somme des notes individuelles	NOTE	Potentiel d'infiltration
Présence d'une note = à 0	1	Très faible à nulle
< 4	2	Faible
4 < et ≤ 7	3	Moyenne
7 < et ≤ 10	4	Forte
>10	5	Très forte

Fig. 30 : Notes finales du potentiel d'infiltration

### L'évaluation de la fonction réservoir de carbone

La fonction réservoir de carbone est liée à la couverture végétale et passe par la détermination de l'indicateur de stock potentiel de carbone dans les sols. Ces données sont disponibles dans un outil développé par l'ADEME, l'outil ALDO (Perez *et al.*, 2019). Ces valeurs de stock sont ensuite classées et notées de 1 à 5 (1 étant le stock de carbone le plus faible et 5 étant le plus important). Pour pouvoir

les spatialiser, les types d'occupation des sols utilisés dans l'outil ALDO sont rattachés à ceux utilisés dans la nomenclature Corine Land Cover disponible sur tout le territoire national.

Le choix de représenter la fonction de réservoir de carbone dans les sols par le seul stock de carbone potentiel contenu dans ces sols peut être discuté. En effet, la fonction de réservoir s'exprime également en notion de flux. De plus, l'outil ALDO se base sur des moyennes régionales significatives et statistiquement valides, qui peuvent cependant masquer des hétérogénéités au niveau local. L'application à une échelle infrarégionale de valeurs moyennes régionales doit donc être en connaissance de cause. De plus, les valeurs pour le sol concernent seulement les 30 premiers centimètres du sol. **Or en moyenne, toutes occupations de sol confondues, on considère qu'il y a encore 50% du carbone sous les 30 premiers cm.**

Dans le cadre du projet MUSE, il a été décidé de se focaliser essentiellement sur le stock de carbone dans le sol et la litière et de mettre de côté le carbone stocké dans la biomasse (cf. Fig.31). Sur le territoire de la MRN, la caractérisation de la couverture végétale est le résultat du croisement des sources de données issues de l'IGN (RPG et photographies aériennes) et de nos campagnes de sondages tarière pendant lesquelles nous avons relevé les modalités d'occupation du sol.

Stocks de carbone de référence par unité de surface		Sol (30cm)	Litière
Niveau 1 (nomenclature « sols »)	Niveau 2 (nomenclature « biomasse »)	tC.ha <sup>-1</sup>	tC.ha <sup>-1</sup>
cultures	cultures	43	
prairies	prairies zones herbacées	56	
prairies	prairies zones arbustives	56	
prairies	prairies zones arborées	56	
forêts	feuillus	81	9
forêts	mixtes	81	9
forêts	conifères	81	9
forêts	peupleraies	81	9
zones humides	zones humides	125	
vergers	vergers	46	
vignes	vignes	39	
sols artificiels imperméabilisés	sols artificiels imperméabilisés	30	
sols artificiels enherbés	sols artificiels arbustifs	56	
sols artificiels arborés et buissonnants	sols artificiels arborés et buissonnants	81	
Haies associées aux espaces agricoles		0	

Fig. 31 : Stock de carbone dans le sol et la litière selon les occupations du sol

Les valeurs de stock potentiel de carbone sont retranscrites en indice selon les valeurs seuils suivantes (cf. fig.32).

Classes (tC/ha)	Indice stock de carbone	signification
≤45	1	très faible
]45;55]	2	faible
]55;65]	3	moyen
]65;75]	4	élevé
>75	5	très élevé

Fig. 32 : Stock de carbone et indices de stockage du carbone dans les sols

### L'évaluation de la fonction réservoir de biodiversité du sol

Pour cette fonction, l'indicateur de biodiversité se base sur des données qui renseignent au niveau national des valeurs moyennes d'abondance en vers de terre et de diversité spécifique des vers de terre d'un sol en fonction du type d'occupation du sol (cf. Fig 33, 34 et 35). Ces données sont disponibles sur le site de l'Office Français de la Biodiversité. Les données d'occupation du sol obtenues par nos propres sources (RPG, MOS, terrain, photographies aériennes) ont été requalifiées selon les modalités de l'OFB pour obtenir les correspondances de valeurs en termes d'abondance lombricienne et de diversité spécifique des vers de terre.

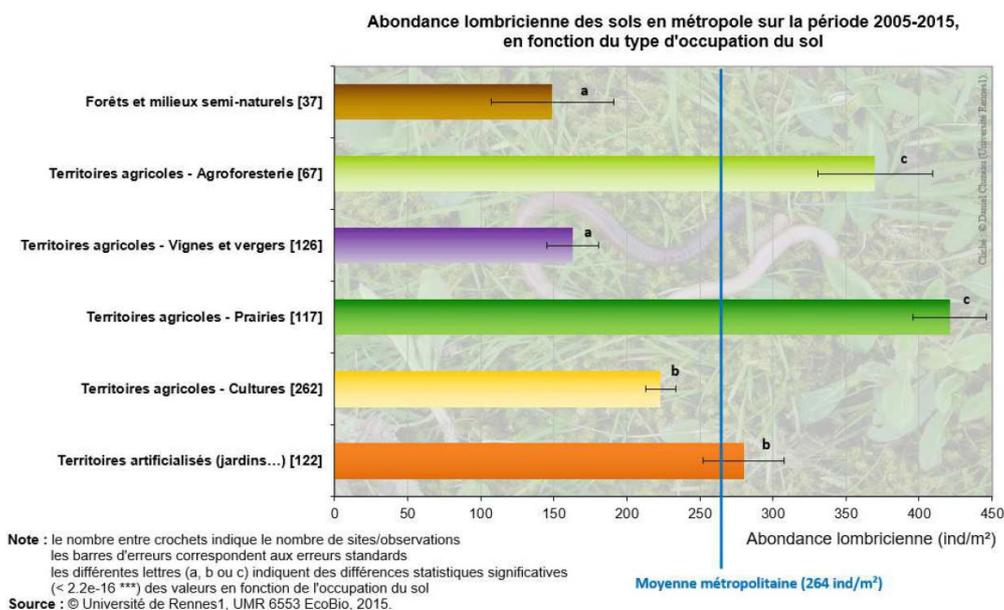


Fig. 33 : Occupation du sol et abondance lombricienne des sols

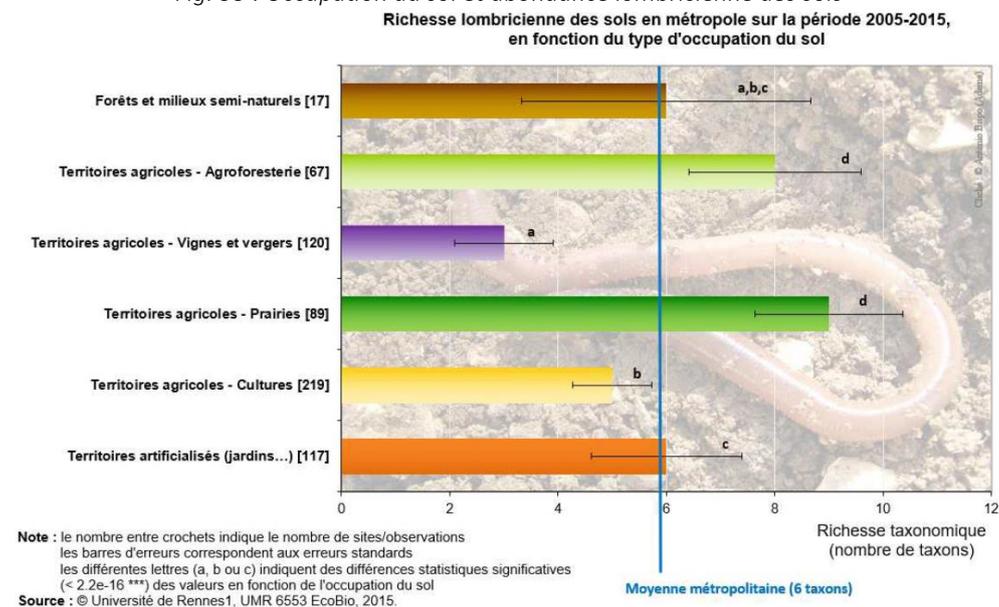


Fig. 34 : Occupation du sol et richesse lombricienne des sols

Code Corine Land Cover	Nomenclature Corine Land Cover	Type de milieu correspondant Office National de la Biodiversité	Abondance de vers de terre (ind/m²)	Diversité spécifique des vers de terre (nb de taxons)
231	Prairies	Territoires agricoles - Prairie	421	9
242	Systèmes cultureaux complexes	Territoires agricoles - Cultures	223	5
243	Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des espaces naturels importants	Territoires agricoles - Cultures	223	5
244	Territoires agroforestiers	Territoires agricoles - Cultures	223	5
311	Forêts de feuillus	Forêts et milieux semi-naturels	149	6
312	Forêts de conifères	Forêts et milieux semi-naturels	149	6
313	Forêts mélangées	Forêts et milieux semi-naturels	149	6
321	Pelouses et pâturages naturels	Forêts et milieux semi-naturels	149	6
322	Landes et broussailles	Forêts et milieux semi-naturels	149	6

Fig. 35 : Occupation du sol, abondance et richesse lombricienne des sols

Chacun des deux jeux de données est mis en classe et noté de 1 à 5 (1 étant l'abondance ou la diversité la plus faible et 5 étant la plus importante), puis les notes attribuées sont sommées afin d'obtenir l'indicateur de biodiversité qui est lui aussi mis en classe et noté de 1 à 5 (cf. Fig.36).

Abondance des vers de terre		Code
<25 ind/m <sup>2</sup>	Très faible	1
Entre 25 et 150 ind/m <sup>2</sup>	Faible	2
Entre 150 et 300 ind/m <sup>2</sup>	Moyenne	3
Entre 300 et 600 ind/m <sup>2</sup>	Elevée	4
> 600 ind/m <sup>2</sup>	Très élevée	5

(Source Univ. Rennes &, UMR 6553 Ecobio, 2015)



Diversité spécifique des vers de terre		Code
<1 taxon	Très faible	1
entre 1 et 2 taxons	Faible	2
entre 3 et 4 taxons	Moyenne	3
entre 5 et 7 taxons	Elevée	4
8 ou plus taxons	Très élevée	5

(Source Univ. Rennes &, UMR 6553 Ecobio, 2015)

Classes	Indice biodiversité	signification
=2	1	très faible
]2;4]	2	faible
]4;6]	3	moyen
]6;8]	4	élevé
>8	5	très élevé

Fig. 36 : Indicateurs de biodiversité des sols

### L'évaluation de la multifonctionnalité des sols

La somme des notes des 4 fonctions puis leur discrétisation en 5 classes (cf. fig.37) permet de déterminer une note de multifonctionnalité des sols comprise entre 1 (multifonctionnalité faible) et 5 (multifonctionnalité élevée).

Somme des scores des indicateurs de la multifonctionnalité des sols			
IPA	IPI	ISC	IBS
1	1	1	1
2	2	2	2
3	3	3	3
4	4	4	4
5	5	5	5

IPA : Indicateur Potentiel Agronomique    ISC : Indicateur Stockage Carbone  
IPI : Indicateur Potentiel d'infiltration    IBS : Indicateur de Biodiversité du Sol



Valeurs et qualificatifs de la multifonctionnalité des sols		
Classification	Valeurs	Qualificatifs
[4 ; 8[	1	Faible
[8 ; 11[	2	Assez Faible
[11 ; 14[	3	Moyenne
[14 ; 17[	4	Assez élevée
[17 ; 20]	5	Élevée

Fig. 37 : Évaluation de la multifonctionnalité des sols

#### 4.1.3. Les choix des fonctions pour caractériser la multifonctionnalité des sols en milieu fortement anthropisé (zones U)

La profondeur de sol en milieu urbain constitue dans bien des cas un indicateur de sa multifonctionnalité potentielle. C'est cette approche que retient la méthode MUSE pour qualifier la capacité des sols urbains à remplir les fonctions d'un sol naturel. Selon cette approche, la notion de

pleine terre représente alors un optimum de multifonctionnalité potentielle des sols urbains. Il s'agit d'un espace non artificialisé, dans la mesure où tout ou partie des fonctions qu'il exerce ne sont pas affectées par le processus d'artificialisation. Un espace de pleine terre s'entend également par sa continuité latérale et son épaisseur (cf. Fig.38).

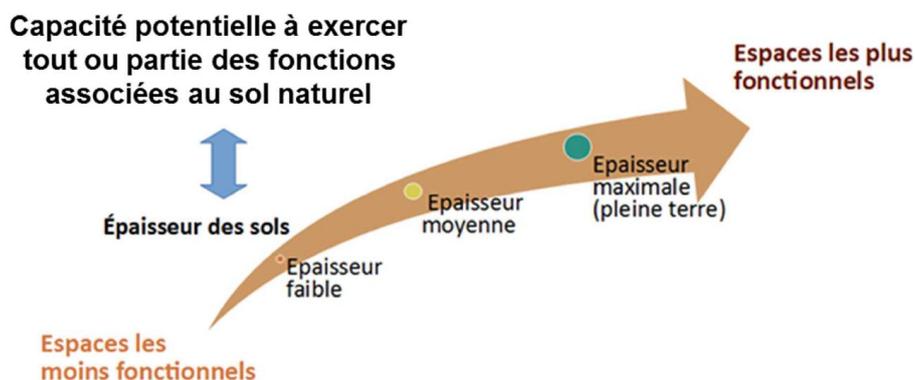


Fig. 38 : Optimum de multifonctionnalité potentielle des sols urbains

Le terme « potentielle » est très important car les usages et pratiques liés aux sols constituent des facteurs d'influence majeurs sur les organismes du sol et les fonctions qu'ils assurent. Ainsi en milieu urbain le processus majeur de la pédogenèse est-il lié à l'homme alors qu'en milieu naturel ce sont les facteurs naturels qui vont influencer. Les données de profondeur de sols n'étant pas disponibles en milieu urbain, on estime que la capacité des sols à exercer toute ou partie des fonctions associées à un sol naturel peut-être appréciée grâce au type de couverture des sols (cf. Fig.39).

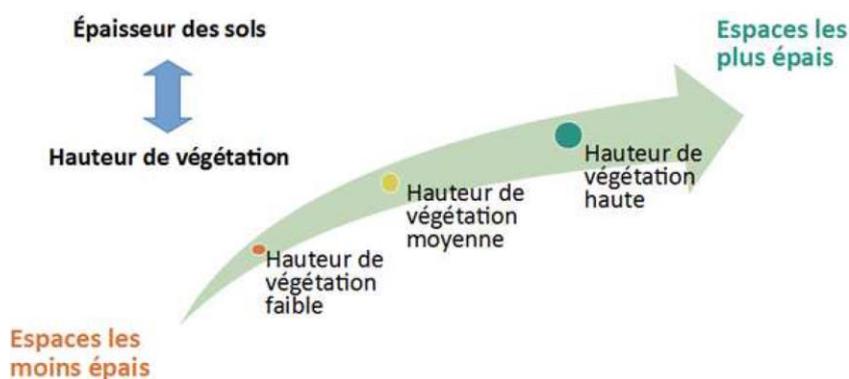


Fig. 39 : Capacité des sols à exercer toute ou partie des fonctions associées à un sol naturel en fonction du type de couverture des sols

La capacité des sols à exercer toute ou partie des fonctions associées à un sol naturel est déterminée en partant de deux principes :

- correspondance strate végétale/épaisseur du sol : les sols urbains, abritant de manière dominante une végétation de type arborée, seront considérés comme des sols profonds ayant une capacité optimale à exercer toutes les fonctions associées à un sol naturel. A contrario, les sols à dominante imperméabilisée comme le bâti et les routes seront considérés comme des sols ayant une capacité nulle. Entre les deux, les sols urbains dont la couverture dominante ne serait ni imperméabilisée ni arborée seront assimilés à des sols ayant une capacité intermédiaire à exercer certaines fonctions associées à un sol naturel.
- correspondance épaisseur du sol/ capacité fonctionnelle : un sol épais est ici considéré comme ayant la capacité la plus forte d'assurer les fonctions d'un sol naturel.

La méthode MUSE consiste à déterminer l'occupation dominante des sols au sein des zones urbanisées à partir des données Corine land Cover Haute Résolution produites par Copernicus pour l'année la plus récente mise à disposition, l'année 2018. Deux couches d'information vont être croisées : la couche imperméabilisation et la couche densité du couvert arboré.

### La couche imperméabilisation

Cette couche, disponible sur le site européen Copernicus (<https://land.copernicus.eu/pan-european/high-resolution-layers/imperviousness>), donne la distribution spatiale des zones artificiellement scellées grâce à une valeur en pourcentage du taux d'imperméabilisation par pixel de 10 m x 10 m. Les modalités de l'imperméabilisation sont indiquées dans le tableau suivant (cf. Fig.40) :

Éléments inclus dans Imperméabilisation CLC HR 2018	Éléments exclus dans Imperméabilisation CLC HR 2018
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zones d'habitation (même avec des maisons dispersées)</li> <li>• Zones de circulation aménagées (aéroports, ports, gares ferroviaires)</li> <li>• Zones de circulation non bâties (pistes d'aéroport, zones portuaires non bâties, gares ferroviaires, parkings)</li> <li>• Routes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voies ferrées non associées à d'autres surfaces imperméables (hors agglomération)</li> <li>• Chantiers de construction sans évolution discernable des structures bâties</li> <li>• Serres non permanentes (couverture plastique temporaire)</li> <li>• Mines, carrières, zones d'extraction de tourbe</li> <li>• Sable, fosses de sable</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voies ferrées associées à d'autres surfaces imperméables (en agglomération)</li> <li>• Zones industrielles, commerciales, usines, installations de production et de distribution d'énergie</li> <li>• Surfaces étanches non bâties, qui font partie de catégories telles que les jardins familiaux, les cimetières, les zones de sport et de loisirs, les terrains de camping, à l'exclusion des espaces verts qui leur sont associés</li> <li>• Terrains de sport couverts de gazon artificiel</li> <li>• Toits végétalisés</li> <li>• Chantiers de construction dont les structures bâties évoluent de manière perceptible</li> <li>• Maisons individuelles (fermes) (si possible identifiées à partir d'images satellites)</li> <li>• Bordures d'eau pavées</li> <li>• Serres permanentes (couvertes toutes l'année)</li> <li>• Parcs de panneaux solaires</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sites de décharges</li> <li>• Zones de végétation naturelle, artificielle et cultivée</li> <li>• Zones sans végétation ou à végétation clairsemée</li> <li>• Champs agricoles non végétalisés, terres arables</li> <li>• Vignes, vergers</li> <li>• Surfaces en gazon utilisées pour les sports de toute nature</li> <li>• Glaciers, neige, eau</li> </ul>

Fig. 40 : Modalités de l'imperméabilisation

### La couche densité du couvert arboré

Cette couche, disponible sur le site européen Copernicus (<https://land.copernicus.eu/pan-european/high-resolution-layers/forests>) fournit un niveau de densité de couverture forestière compris entre 0 et 100% par pixel de 10 m x 10 m. Les modalités de couvert arboré sont indiquées dans le tableau suivant (cf. Fig.41) :

Éléments inclus dans Densité du couvert arboré CLC HR 2018	Éléments exclus dans Densité du couvert arboré CLC HR 2018
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Feuillus persistants/caducs, sclérophylles et conifères de toute utilité</li> <li>• Forêts (adulte et en développement)</li> <li>• Vergers, oliveraies, plantations d'arbres fruitiers et autres, zones agroforestières</li> <li>• Forêts de transition, forêts en régénération</li> <li>• Groupes d'arbres dans les zones urbaines (ruelles, parcs et jardins boisés)</li> <li>• Zones dédiées à la gestion et aux caractéristiques d'utilisation de l'intérieur des forêts (routes forestières, coupe-feu, éclaircies, pépinières forestières, etc.)</li> <li>• Zones de dégâts se manifestant à l'intérieur des forêts (zones partiellement brûlées, dégâts causés par les tempêtes, dégâts causés par les insectes, etc.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zones ouvertes à l'intérieur des forêts (routes, zones de végétation ouvertes en permanence, coupes à blanc, zones entièrement brûlées, autres zones forestières gravement endommagées, etc.)</li> <li>• Les zones couvertes d'arbustes nains, comme les landes et les bruyères</li> <li>• Vignes</li> <li>• Pin nain / aulne vert dans les zones alpines</li> <li>• Arbustes méditerranéens (maquis, garrigue, etc.)</li> <li>• Arbustes</li> </ul>

Fig. 41 : Modalités des couverts arborés

### Traitements géomatiques des deux couches Copernicus

L'objectif est de déterminer 3 niveaux de capacité des sols urbains à exercer toute ou partie des fonctions associées à un sol naturel :

- un niveau optimal correspondant à une végétation arborée dominante sur la maille étudiée,
- un niveau intermédiaire lié à des sols ni imperméabilisés en majorité ni arborés en majorité sur la maille étudiée
- un niveau nul pour lequel les sols sont à dominante imperméabilisés sur la maille considérée.

Cette catégorisation nécessite des traitements géomatiques spécifiques qui se déroulent en 4 étapes. La 1<sup>ère</sup> étape consiste à générer une 3<sup>ème</sup> couche dénommée « Sols non imperméabilisés et non arborés ». Pour cela, il faut partir d'une base 100 et lui soustraire les valeurs d'imperméabilisation et les valeurs de densité du couvert arboré. Des valeurs négatives apparaissent : c'est normal, cela signifie qu'il y a eu des superpositions. Par exemple, on peut avoir un pixel à 40% d'imperméabilisation et le même pixel à 65% de couvert arboré en raison de problème de superposition de valeurs lors du traitement des images satellites. On obtient donc un résultat négatif qu'il faut ramener à 0. Il faut alors reclasser la table de la couche obtenue en affectant la valeur 0 à toutes les valeurs négatives. On obtient alors une couche des sols qui ne sont ni compris dans la couche « Imperméabilisation » ni dans la couche « Densité du couvert arboré » que l'on va nommer « Sols non imperméabilisés et non arborés ».

La 2<sup>ème</sup> étape vise à déterminer la dominance de l'occupation du sol entre les 3 couches « Imperméabilisation », « Densité de couvert arboré » et « Sols non imperméabilisés et non arborés ». L'opération « MAX » permet de générer une couche où la valeur de chaque pixel correspond à la valeur dominante parmi les pixels des trois couches. Afin de savoir à quelle couche la valeur de chaque pixel appartient, il suffit de produire trois nouvelles couches résultant de la soustraction successive de la couche obtenue via l'opération MAX avec chaque couche d'origine. Les couches obtenues sont appelées « Imperméabilisation dominante », « Densité de couvert arboré dominante » et « Sols non imperméabilisés et non arborés dominants ». **Sur chacune de ces couches, lorsque le résultat est 0 cela signifie que le pixel dominant qui a été retenu est bien celui de la couche concernée.**

L'étape suivante porte sur la sommation des couches « Imperméabilisation dominante », « Densité de couvert arboré dominante » et « Sols non imperméabilisés et non arborés dominants ». L'idée est d'avoir sur la même couche les valeurs dominantes des pixels de chaque catégorie. Pour cela, il suffit de sommer les couches. Mais il est nécessaire au préalable de reclasser les tables des trois couches obtenues : par exemple, pour la couche « Imperméabilisation dominante », on peut reclasser les valeurs égales à 0 en valeur 1 et le reste en 0. Pour la couche « Densité de couvert arboré dominante », on peut reclasser les valeurs égales à 0 en 2 et le reste en 0... Il est possible ensuite de sommer les trois couches dominantes pour obtenir la couche finale.

La dernière étape consiste à réaliser une reclassification de la couche finale. Le choix dans cette méthode a été de reclasser les superpositions de pixels de façon à ce que la part de sols arborés ou végétalisés ne soit pas surestimée. Par exemple, 3 est la somme de la superposition des pixels des couches « Imperméabilisation dominante » (1) et « Densité de couvert arboré dominante » (2). Cette valeur 3 est reclasser « Imperméabilisation dominante » (1). 5 est la somme de la superposition des pixels des couches « Imperméabilisation dominante » (1) et « Sols non imperméabilisés et non arborés dominants » (4). On procède au reclassement « Imperméabilisation dominante » (1). Finalement on obtient une couche avec les trois classes voulues traduisant la capacité des sols à plus ou moins exercer toute ou partie des fonctions associées à un sol naturel.

## 4.2. Caractériser les fonctions des sols en milieu urbain

La mission sur les sols urbains de l'étude a été motivée par la volonté d'aller au-delà dans la connaissance des sols en milieu urbain de ce que peut proposer l'outil MUSE. Il s'agit en effet de prendre la mesure des conditions de faisabilité de prospections pédologiques à la tarière pour envisager à court terme une transposition de l'étude de la multifonctionnalité des sols en contexte fortement anthropisé. Pour cela, la Métropole Rouen Normandie a sélectionné 11 sites tests en Zones UP (zone de parcs urbains) et URP (zone de renouvellement urbain) susceptibles de permettre une caractérisation des sols à partir de sondages tarière (cf. Fig.42). Ces sites ont été sélectionnés pour les raisons suivantes :

- faisabilité technique : une possibilité de réalisation de sondages tarière à la main sur des secteurs non imperméabilisés,
- amélioration des connaissances pour orienter la gestion future des espaces verts,
- orientation des choix dans les projets de renouvellement urbain pour créer des zones de fraîcheur.

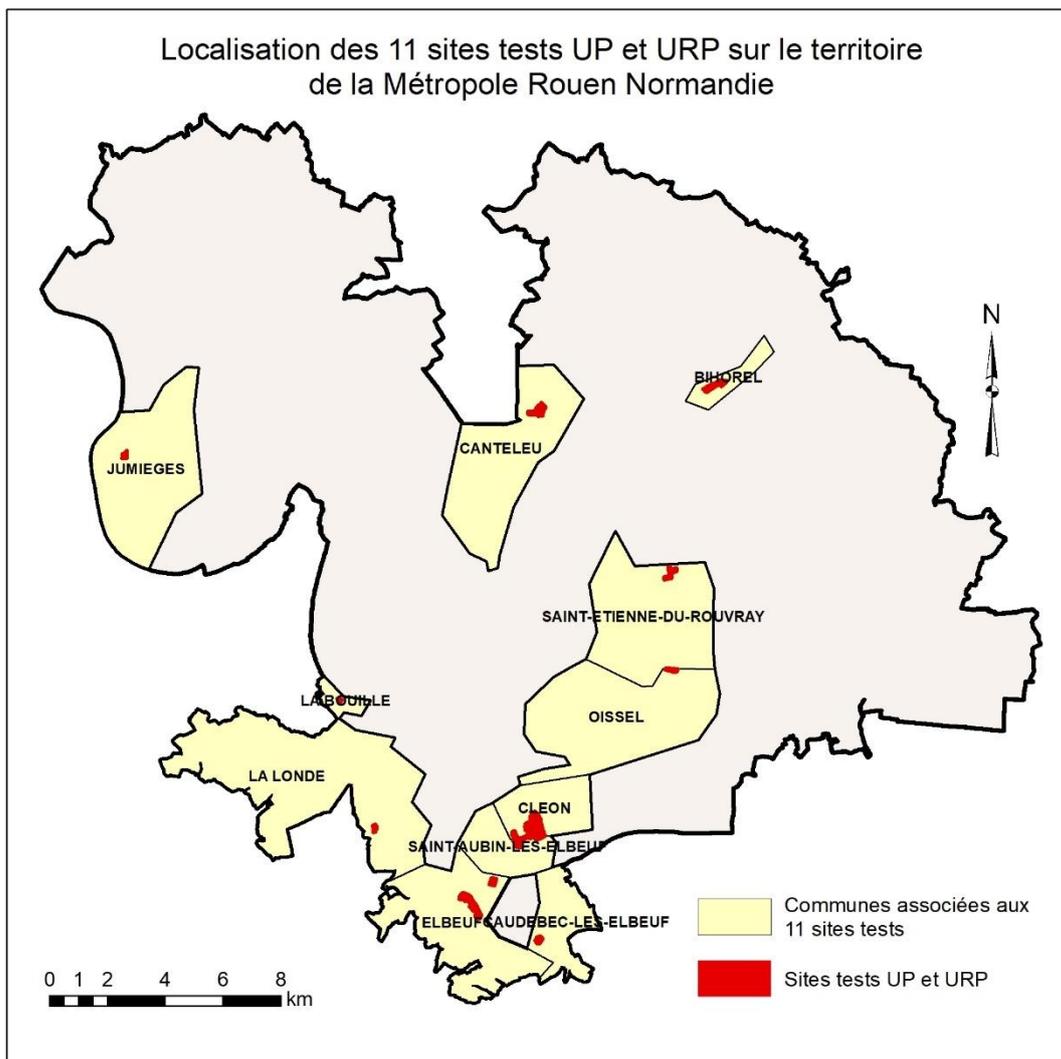
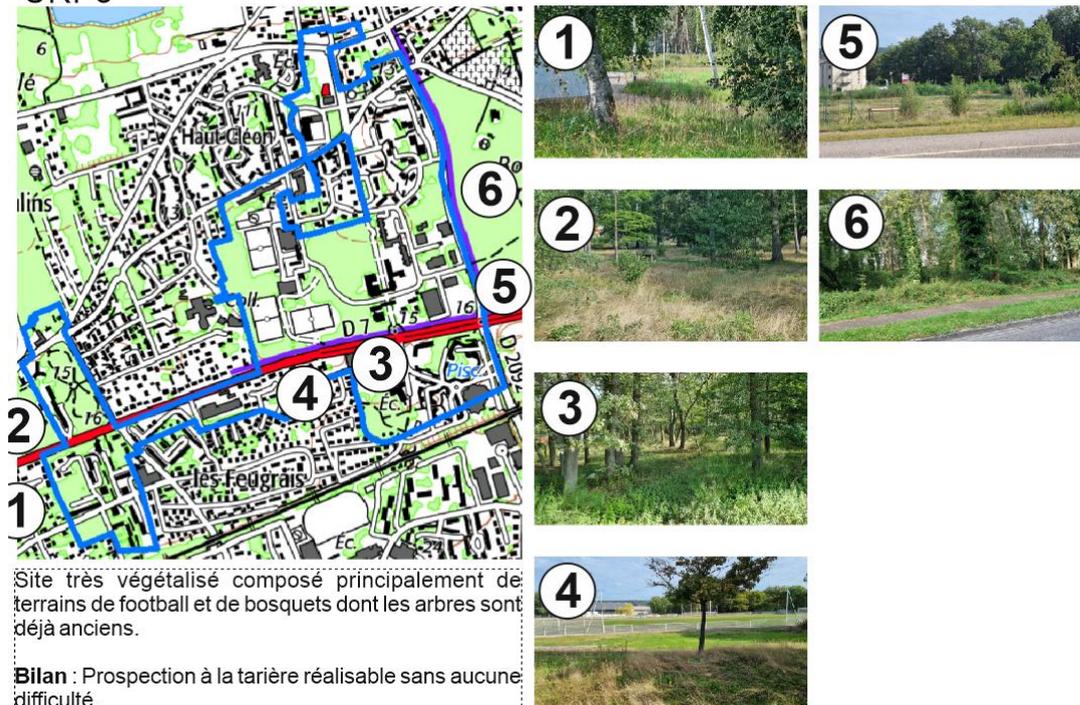


Fig. 42 : Localisation des 11 sites tests UP et URP sur la Métropole Rouen Normandie

Chaque site test a été parcouru dans son intégralité afin d'identifier des espaces végétalisés qui pourraient permettre la réalisation de sondages. Les informations collectées lors de cette première phase de terrain ont permis de préciser les possibilités de reconnaissance des sols urbains et de valider une campagne de sondages pour tous les sites tests (cf. Fig.43).

## URP3



## URP32



Site fortement imperméabilisé. Les espaces végétalisés se limitent à la pointe nord (1) et à l'aménagement extérieur du centre commercial (3).

**Bilan** : Prospection à la tarière réalisable dans quelques secteurs pour lesquels le niveau d'anthropisation risque d'être élevé.



Fig. 43 : Reconnaissance des sols urbains et validation des prospections terrain à la tarière pour tous les sites tests

# Résultats

# 1. Le Référentiel Sol de la Métropole

## 1.1. L'inventaire et la cartographie des sols en Zones A, N et AU

### 1.1.1. Positionnement et réalisation des sondages tarière et des fosses pédologiques

La caractérisation et la représentation spatiale des sols reposent dans un premier temps sur la production de connaissances issues de sondages à la tarière à main. La densité des sondages retenue est d'un sondage pour 20 à 30 ha de surfaces agricoles et naturelles et d'un sondage pour 2 à 3 ha de surfaces en Zone AU. Ces densités doivent permettre de réaliser à terme une cartographie des sols à l'échelle du 1/50 000 en contextes agricole et naturel et à l'échelle du 1/10 000 en Zone AU. Le positionnement des points de sondage résulte en priorité de la prise en compte des spécificités physiographiques du territoire.

#### Une topographie très contrastée

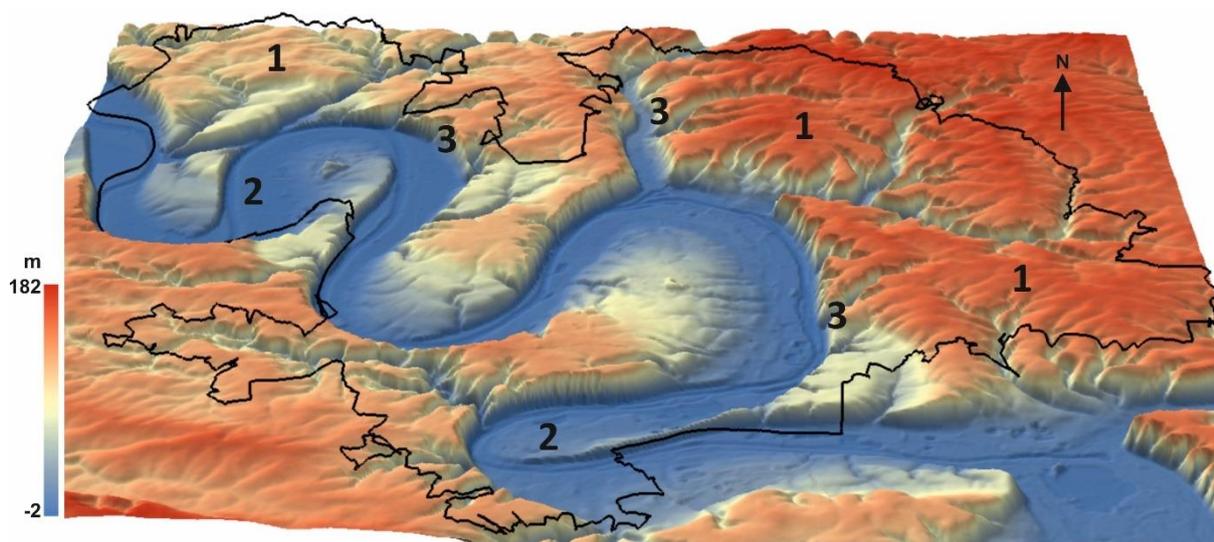
La représentation en bloc diagramme du MNT (Modèle Numérique de Terrain) de la MRN souligne bien les contrastes de modelé du territoire. Les altitudes oscillent entre -2 m et 182 m et s'organisent autour de trois entités topographiques : un plateau ondulé, une vallée à fond plat et des versants de transition entre les deux premières formes de relief (cf. Fig.44).

Le plateau occupe les parties périphériques de la Métropole de part et d'autre de la Seine qui l'a incisé selon un axe sud-est/nord-ouest. Les interfluves de la partie orientale du plateau dominant d'une trentaine de mètres ceux de la partie occidentale. Ils sont très régulièrement entaillés par des vallons secs qui façonnent les surfaces sommitales du plateau en de grandes ondulations convexes et concaves. A mesure que l'on se rapproche des rebords de plateau, la déclivité s'accroît rapidement en formant des versants à la convexité marquée.

La vallée de la Seine s'est encaissée de près de 100 m dans le plateau. A cet endroit, la très faible déclivité du profil en long du fleuve explique son tracé en 5 vastes méandres. Le lit majeur à fond plat vient buter sur les versants abrupts des rives concaves de la Seine alors qu'il cède progressivement sa place à de longs versants à pente douce sur les rives convexes, versants généralement disséqués par des affluents du fleuve. La jonction entre le plateau et la vallée de la Seine est assurée par des versants de transition aux caractéristiques complexes.

Sur les rives concaves de la Seine, les versants de transition sont caractérisés par une forte verticalité qui pourrait les confondre avec des falaises. La très forte déclivité limite l'implantation de la végétalisation, ce qui permet d'observer la nature et la disposition des couches géologiques. Les pieds de versant sont tapissés de petits éboulis liés à la désagrégation de la roche sous l'effet du climat. La partie sommitale des versants est régulièrement incisée par des vallons secs en V qui se sont formés par érosion hydrique. En de nombreux endroits, ces parois rocheuses sont interrompues par des vallées secondaires dont les premières ramifications prennent naissance sur les interfluves du plateau. Il s'agit de vallées étroites, drainées, très encaissées dans la topographie et qui, dans leur partie amont et en situation d'opposition de versant ouest/est, présentent une dissymétrie de versant soulignant des versants tournés vers l'est plus doux.

Sur les rives convexes de la Seine, la jonction entre vallée et plateau est plus progressive. La dissection des versants par les cours d'eau y est plus marquée. Elle se manifeste par une plus forte densité de vallées et de vallons et un moindre encaissement des talwegs.



1 : Plateau ondulé, 2 : vallée à fond plat, 3 : versants de transition entre 1 et 2

Fig. 44 : Les 3 entités topographiques sur le territoire métropolitain

### Un contexte géologique étroitement lié aux caractéristiques orographiques

Le lien entre topographie et géologie est très fort sur le territoire de la MRN. Rattaché au Bassin parisien, le substrat local (cf. Fig.45) est composé de roches sédimentaires carbonatées (craie) datées du Crétacé (C3, C4 et C5-6). Ce socle de roches cohérentes porte tous les éléments constitutifs du plateau. On ne les observe qu'à la faveur de versants abrupts en rive concave de la Seine. Au cours du Cénozoïque, ces roches ont subi en surface une forte dégradation responsable de la formation d'un épais manteau d'altération : l'argile à silex (RS).

D'une épaisseur variable mais souvent de plusieurs mètres, les argiles à silex peuvent s'observer en place sur les rebords de plateau. Sur les parties sommitales du plateau, elles sont surmontées par des limons de plateau (LP). Datés du Quaternaire récent, ils ont été apportés par les vents et se sont accumulés pour former progressivement une formation superficielle dont l'épaisseur varie d'un à plusieurs mètres. Particulièrement érodibles, les loess ont été décapés partiellement ou totalement sur les versants convexes à pente moyenne ou forte. A noter que l'on retrouve aussi des limons éoliens en place sur la partie basale de certains versants à pente très faible (LV).

La dissection du plateau par les cours s'est faite progressivement au Quaternaire. Les différentes phases d'encaissement du réseau hydrographique sont révélées par la présence des alluvions anciennes de la Seine (Fya, Fyb, Fyc-d). Elles forment d'anciennes terrasses sur les rives convexes de la Seine, terrasses aujourd'hui partiellement démantelées par l'érosion hydrique. L'actuel lit majeur du fleuve est composé d'alluvions récentes (Fz) qui témoigne de la dernière phase d'incision du plateau à l'Holocène.

L'encaissement du réseau hydrographique au Quaternaire a généré la formation de versants propices aux dynamiques de colluvionnement pendant cette période géologique (C/S). Elle s'est principalement manifestée sur les versants froids et humides donc tournés vers l'est et le nord. Dans ce cas, les colluvions sont issues du remaniement et du transport de limons éoliens mélangés à des argiles à silex parfois enrichis de craie.

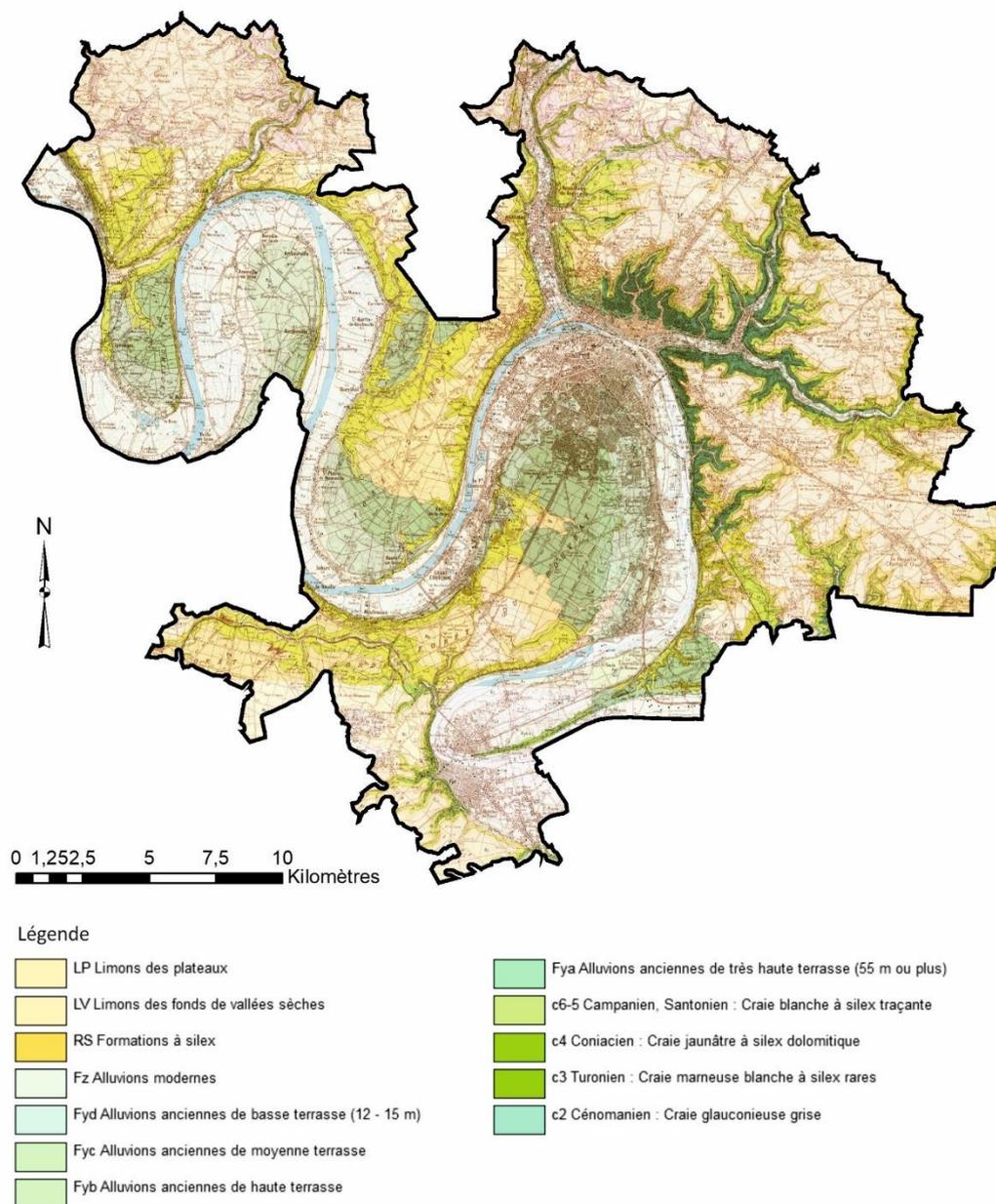


Fig. 45 : Le contexte géologique métropolitain

### Des sondages théoriques aux sondages effectifs

L'analyse du contexte physiographique a permis de positionner les points de sondage théoriques permettant de couvrir toute la diversité des situations topographiques et géologiques. Cette démarche vaut principalement pour les Zones A et N. Pour les Zones AU, les faibles superficies concernées ne permettaient pas de faire valoir cette diversité de situation (cf. Fig. 46).

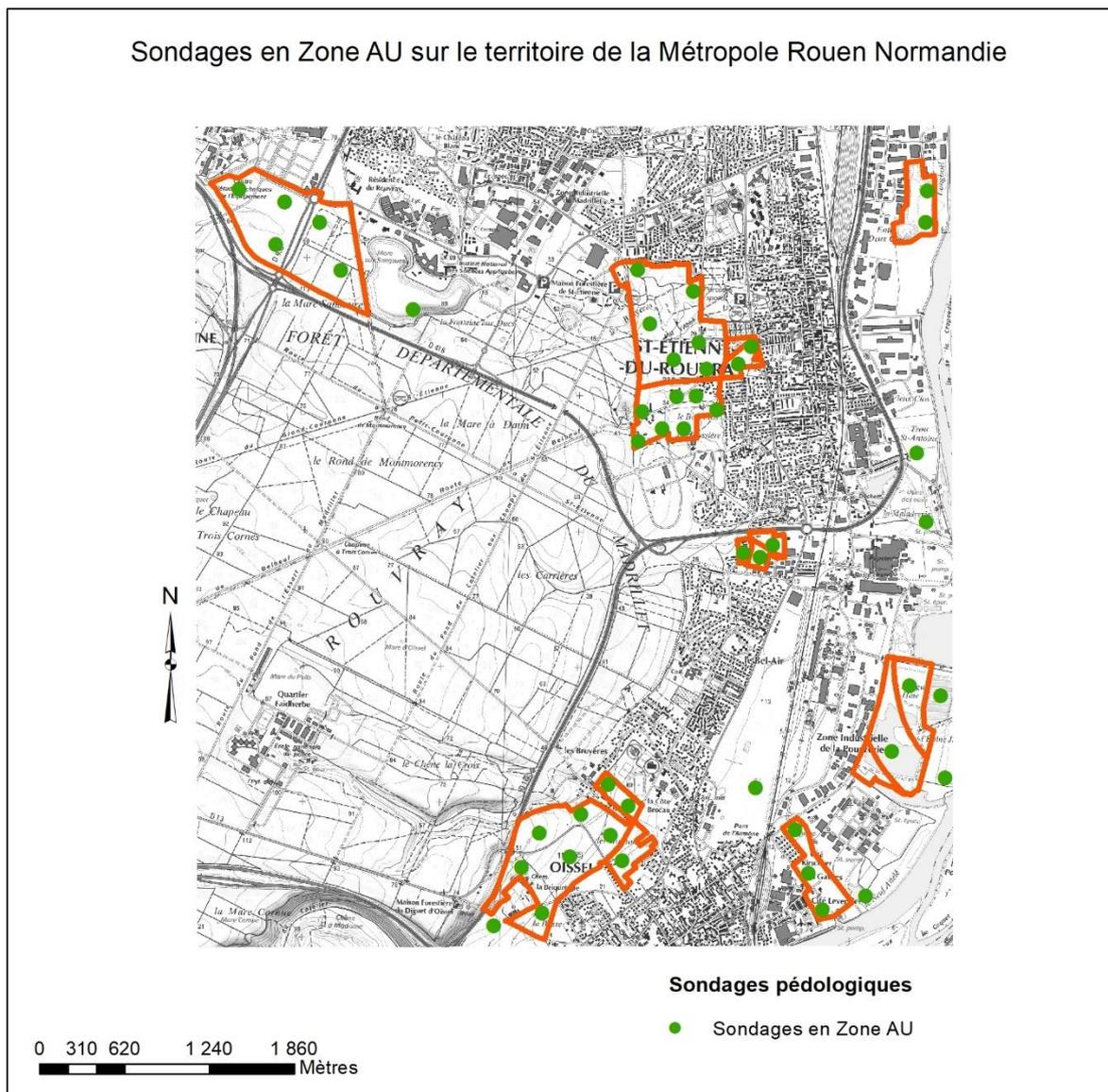


Fig. 46 : Positionnement des points de sondage en zone AU

Au total, 1026 sondages théoriques ont été placés en zones agricoles et naturelles (cf. Fig.47). Ces sondages indiquent une variation légère de la densité de points d'observation des sols. Elle est un peu plus faible lorsque le milieu est plus homogène et un peu plus élevée lorsque le contexte topographique apparaît plus complexe.

Certains points de sondage théoriques n'ont pas pu être couverts pour différentes raisons : sites urbanisés, pollués, inaccessibles ou refus des propriétaires. Au total, 40 points n'ont pas pu être prospectés, ce qui n'a pas eu d'incidence sur la production de la carte de sols compte tenu du nombre conséquent de sondages réalisés par ailleurs (983).

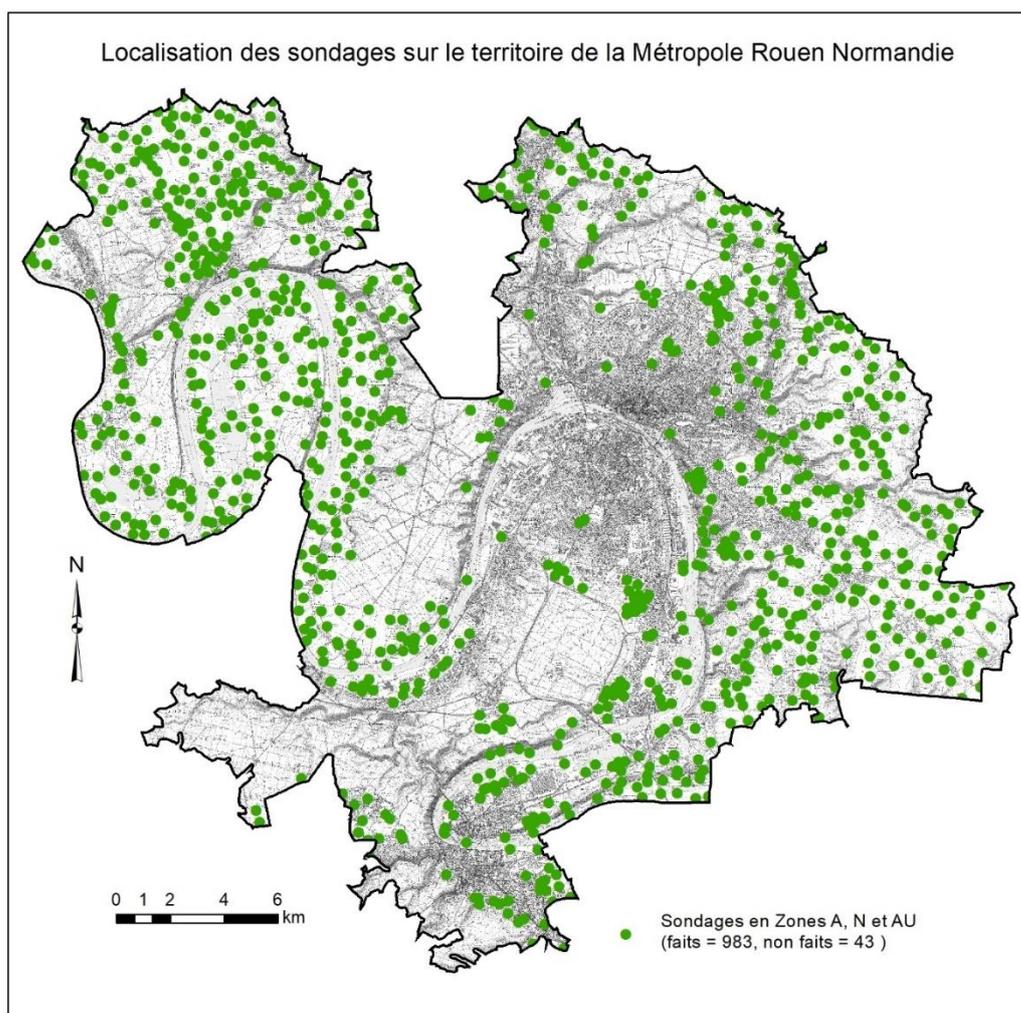


Fig. 47 : Localisation de tous les sondages tarière sur le territoire métropolitain

### Réalisation des sondages

Au moyen d'une tarière à main de type Edelman, nous avons reconstitué les profils de sol aux points de sondage (cf. Fig.48). Les carottes (échantillons de sol prélevés) sont placées dans une gouttière graduée tous les 10 cm pour observer les variations verticales de la couverture pédologique sur les critères couleur, texture, effervescence à HCl-, hydromorphie, éléments secondaires et charge caillouteuses. Ces relevés permettent de distinguer différents horizons issus de la pédogenèse et des pratiques de gestion des sols. Les sondages ont été effectués principalement lors du premier semestre 2023. Les données recueillies ont permis de fixer le nombre de fosses pédologiques à ouvrir et de les localiser.



Fig. 48 : Exemple de profil de sol aux points de sondage

### Localisation des fosses pédologiques

Afin de prendre en compte la diversité des types de sol observée lors des sondages tarière, nous avons fixé à 30 le nombre de fosses pédologiques à ouvrir. Elles ont été réparties uniformément afin de pouvoir disposer d'une référence locale en tout point du territoire (cf. Fig.49). L'ouverture des fosses a nécessité de disposer de l'accord des exploitants/propriétaires des terrains concernés, ce qui n'a pas posé de difficultés en domaine public. En revanche, la recherche des contacts en domaine privé et le recours à des sites de remplacement lors des refus se sont avérés plus contraignants et particulièrement chronophages. En dépit de ces difficultés, nous avons réussi à tenir l'objectif de 30 fosses.

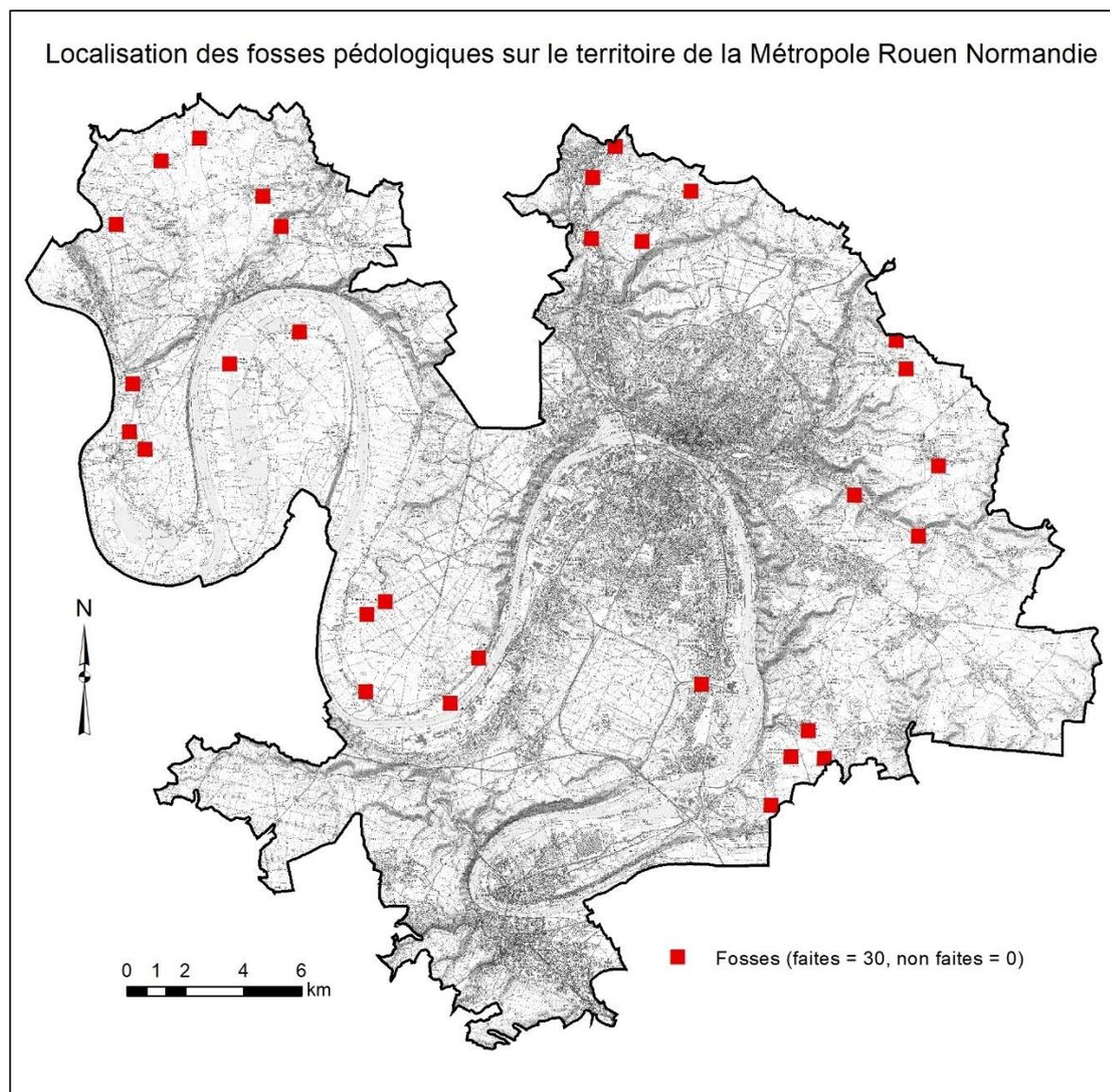


Fig. 49 : Localisation des 30 fosses pédologiques sur le territoire métropolitain

### Les étapes associées à l'ouverture et à l'étude des fosses pédologiques

La campagne d'ouverture des 30 fosses s'est déroulée sur deux semaines au mois d'août 2023. L'entreprise de terrassement Jamelin située à Franqueville-Saint-Pierre nous a accompagnés pour réaliser les fosses au moyen d'un tracto-pelle (cf. Fig.50). Lorsque la profondeur du sol le permettait, nous avons excavé 1 à 2 m<sup>3</sup> de terre.



*Fig. 50 : Tracto-pelle mobilisé pour ouvrir les fosses pédologiques*

Une fois les profils rafraîchis et décrits (cf. Fig.51), nous avons échantillonné et ensaché chaque horizon de sol (cf. Fig.52) afin de déterminer en laboratoire (LILANO à Saint-Lô) leurs propriétés physiques et physico-chimiques.



*Fig. 51 : Profil de sol rafraîchi et décrit*



Fig. 52 : Échantillons ensachés, référencés puis acheminés au LILANO de Saint-Lô.

Un exemple de résultat analytique est présenté ci-dessous (cf. Fig.53 et 54).

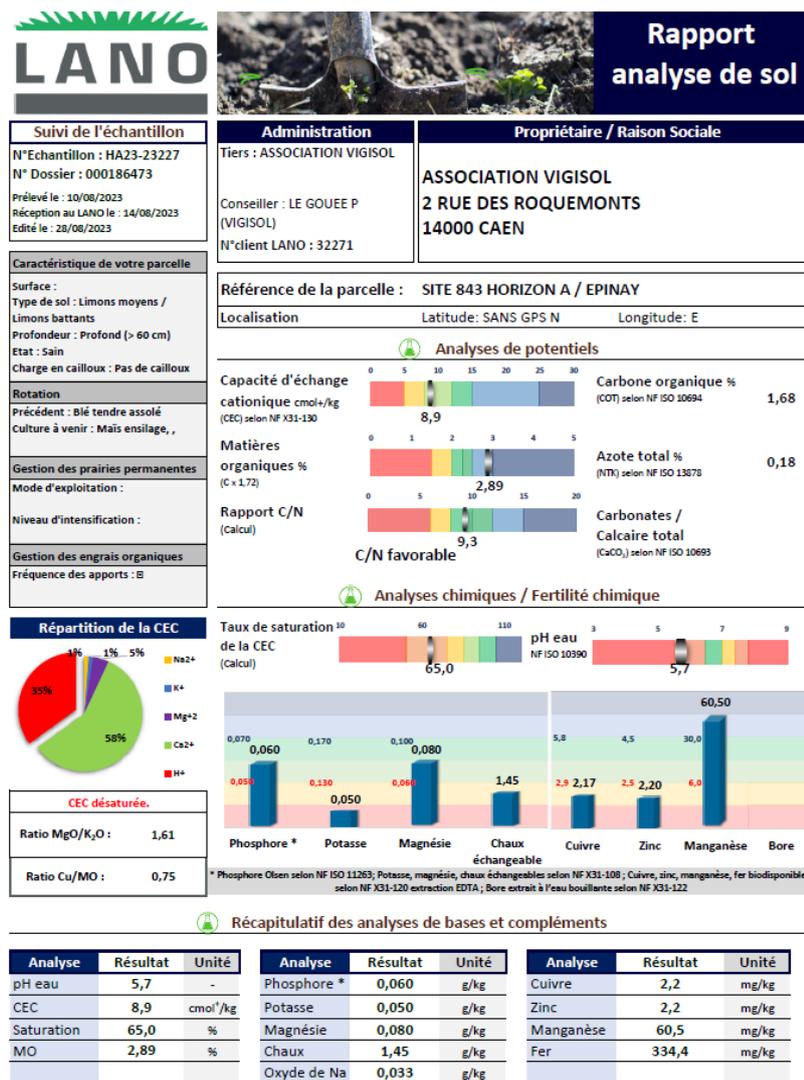
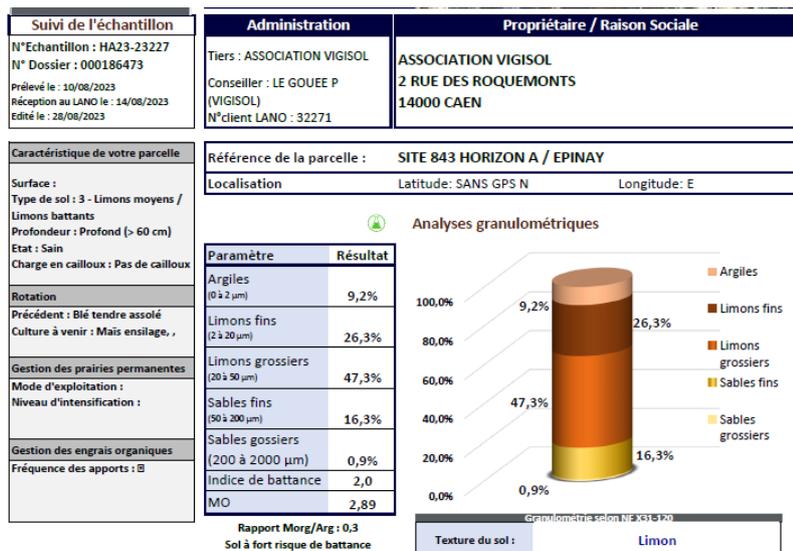


Fig. 53 : Exemple de fiche analytique 1/2



#### Relations entre texture et comportements agronomiques

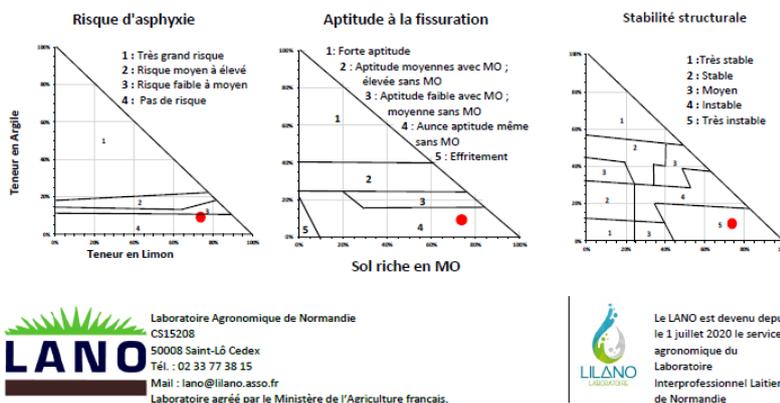


Fig. 54 : Exemple de fiche analytique 2/2

### 1.1.2. Construction de la carte des sols

La représentation spatiale des données collectées par les sondages tarière et les fosses découle d'une démarche associant pastillage, maquettage et numérisation des informations pédologiques, telle que précisée dans la partie méthodologique du présent rapport.

#### Le pastillage

Afin de bénéficier d'une représentation spatialisée des données relatives aux fiches de description des sondages tarière, nous devons procéder à l'étape du pastillage. Cette procédure permet de retranscrire sous la forme d'une combinaison de codes les caractéristiques pédologiques principales de chaque sondage (cf. Fig.55, 56 et 57) et de la reporter sur un fond de carte papier (scan 25 de l'IGN) à l'endroit précis où le sondage a été réalisé. On complète cette retranscription en affectant à chaque point de sondage une pastille de couleur en lien avec les caractéristiques de la pédogenèse.

**Saisie SONDAGES** S (PA 2000) - U.M.A. Sol et Environnement - INRA Montpellier modifiée Infos 2008

N° sondage 0740 N° Etude          Date 10/03/13 Auteurs          érosion           
 Commune          Végétation Prairie Matériau parental LP / RS  
 Humus (sous forêt)          Pente (%)          Orientation pente          GPS (WGS84)           
 EG en surface          Cause arrêt          Prof arrêt (cm)         

**Profondeurs** en cm: 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120

**Texture** (circled): 1. 15, 2. 15, 3. 20, 4. 20, 5. 20, 6. 20

**Effervescence** (circled): Intensité 1. 1, 2. 1, 3. 1, 4. 1, 5. 1, 6. 1; Localisation 1. 1, 2. 1, 3. 1, 4. 1, 5. 1, 6. 1

**Humidité** (circled): 1. F, 2. F, 3. F, 4. F, 5. F, 6. F

**Couleur** (circled): Horizon (Munsell) 1. No 10S3, 2. No 10S3, 3. No 10R4; Nom horizon 1. A1, 2. E1, 3. S1g, 4. RS, 5. RS, 6. RS

**Taches** (circled): A = taches d'oxydation, B = taches de réduction, C = taches de dégradation; Abondance (A, B et C) 1. 4, 2. 4, 3. 4, 4. 4, 5. 4, 6. 4

**Éléments secondaires** (circled): Abondance 1. 0, 2. 0, 3. 0, 4. 0, 5. 0, 6. 0; Nature 1. 1, 2. 1, 3. 1, 4. 1, 5. 1, 6. 1; Dureté 1. 1, 2. 1, 3. 1, 4. 1, 5. 1, 6. 1; Dimensions 1. 1, 2. 1, 3. 1, 4. 1, 5. 1, 6. 1; Forme 1. 1, 2. 1, 3. 1, 4. 1, 5. 1, 6. 1; Type 1. 1, 2. 1, 3. 1, 4. 1, 5. 1, 6. 1

**Éléments grossiers** (circled): Abondance 1. 1, 2. 1, 3. 1, 4. 1, 5. 1, 6. 1; Nature (A et B) 1. 1, 2. 1, 3. 1, 4. 1, 5. 1, 6. 1; Forme (A et B) 1. 1, 2. 1, 3. 1, 4. 1, 5. 1, 6. 1; Taille (A et B) 1. 1, 2. 1, 3. 1, 4. 1, 5. 1, 6. 1

**Schéma synthétique** (circled): 0-10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120; RS ang. luv.

Commentaires: No 10S3 - Red. XE soil de grade

Nom de sol (RP)          N°DoneSol         

Fig.55 : Caractéristiques pédologiques codées pour le postillage

Exemple de codification des types de sol (cf. Fig.X)

Types de sol	Codes	Types de sol	Codes
Lithosol	1	Calcosol colluvial à caractère rédoxique	56
Rankosol	2	Calcisol	57
Brunisol	3	Calcisol à horizon rédoxique de profondeur	58
Brunisol à horizon rédoxique de profondeur	4	Calcisol à caractère rédoxique	59
Brunisol à caractère rédoxique	5	Calcisol colluvial	60
Brunisol-Rédoxisol	6	Calcisol colluvial à horizon rédoxique de profondeur	61
Brunisol luvique	7	Calcisol colluvial à caractère rédoxique	62
Brunisol luvique à horizon rédoxique de profondeur	8	Fluviosol	63
Brunisol luvique à caractère rédoxique	9	Fluviosol à horizon rédoxique de profondeur	64
Brunisol luvique-Rédoxisol	10	Fluviosol à caractère rédoxique	65
Brunisol fluviqque	11	Fluviosol-Rédoxisol	66
Brunisol fluviqque à horizon rédoxique de profondeur	12	Fluviosol à horizon réductique de profondeur	67
Brunisol fluviqque à caractère rédoxique	13	Fluviosol à caractère réductique	68
Colluviosol	14	Fluviosol-Réductisol	69
colluviosol à horizon rédoxique de profondeur	15	Fluviosol carbonaté	70

Fig. 56 : Exemple de codification des types de sol

Epaisseurs cm	Codes	Textures	Codes	% EG	Codes
<10	1	Alo	0	0	0
[10-20[	2	A	1	<2	1
[20-40[	3	AL	2	[2-5[	2
[40-60[	4	LA	3	[5-10[	3
[60-80[	5	LAS	4	[10-20[	4
[80-100[	6	LSA	5	[20-30[	5
[100-120[	7	LM	6	[30-50[	6
>=120	8	LMS	7	[50-70[	7
		LS	8		
		LLS	9		
		LL	10		
		AS	11		
		SA	12		
		SL	13		
		S	14		

Fig. 57 : Codification des épaisseurs, textures et éléments grossiers

Ainsi, un BRUNSOL à caractère rédoxique d'une épaisseur de 80 cm, à texture limono-argileuse et détenant 5% d'éléments grossiers sera retranscrit sous la combinaison suivante : 5-6-3-3 et le point de sondage correspondant sera recouvert d'une pastille marron associée à deux petits traits bleus verticaux. Le pastillage permet d'avoir une vision synoptique des caractéristiques de sol aux points de sondage et fournit un premier niveau de compréhension des logiques de répartition des types de sol en lien avec les spécificités orographiques puisque ces données se superposent aux courbes isohypses du scan 25 (cf. Fig.58).



Fig. 58 : Exemple de résultats issus du pastillage

Un second niveau de compréhension de la distribution spatiale des sols est obtenu par croisement entre les données issues du pastillage et le contexte géologique. Ainsi, sur l'exemple ci-dessous (cf. Fig.59), en comparant les données type de sol (code 33 du sondage 47 relatif aux NÉOLUVISOLS), relief et géologie, on souligne l'approximation de la carte géologique du BRGM à 1/50 000 qui signale la présence de l'argile à silex à cet endroit (couleur rose sur la carte de droite) alors que l'on sait que ces sols lessivés se développent sur limons éoliens (couleur blanc cassé à l'extrême nord de la zone). Par conséquent, on ne peut pas établir de logique spatiale entre ce type de sol et les données géologiques qui sont erronées (sous-estimation de la présence des limons éoliens sur le rebord de plateau).

En revanche, le sondage 52 établit un lien retrouvé fréquemment par ailleurs entre le type de sol en place (BRUNISOL) et la présence d'argiles à silex. La géologie, bien représentée à cet endroit, apparaît comme un élément supplémentaire dans la compréhension de la répartition spatiale des types de sol. L'erreur commise dans le cas du sondage 47 relève des particularités de la topographie locale qui traduit la présence d'un rebord de plateau à pente douce qui a limité l'érosion hydrique et le décapage des limons éoliens. Ce type de raisonnement mené pas à pas sur l'ensemble du territoire permet de procéder au maquetage.

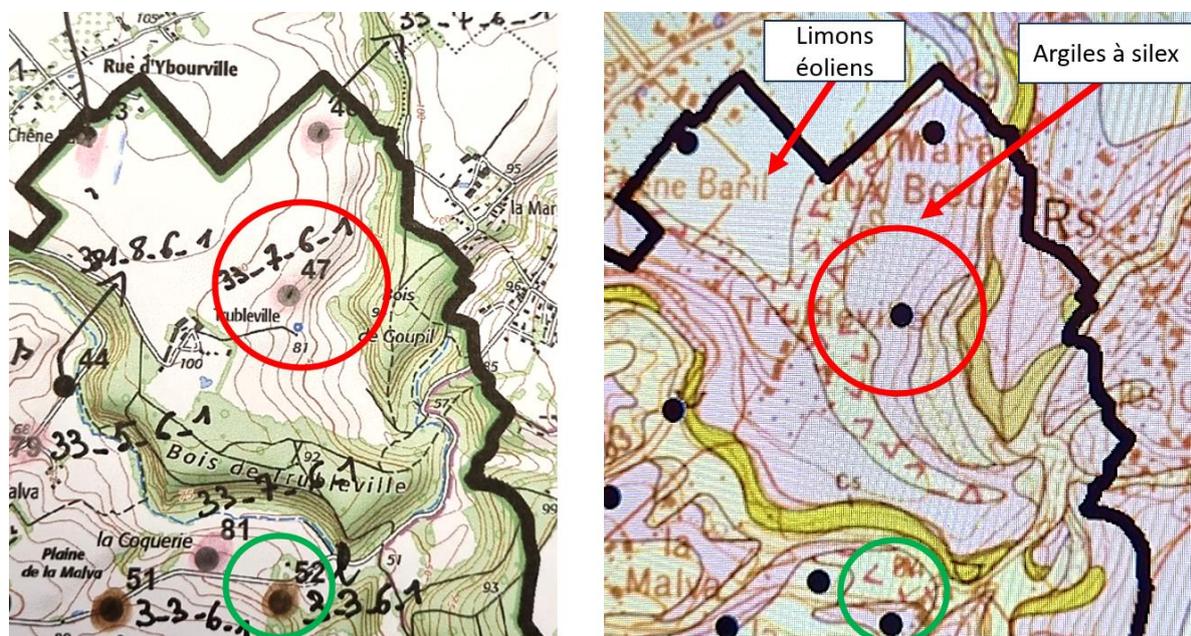


Fig. 59 : Exemple de compréhension des logiques d'organisation spatiale des sols

### 1.1.3. Présentation des Unités Cartographiques de Sol sur le territoire de la Métropole Rouen Normandie

#### Le maquetage

La mise en évidence des logiques de distribution des types de sol dans l'espace permet de passer à l'étape de l'interpolation des données ponctuelles qui se présente sous la forme d'une carte des sols en version papier autrement qualifiée de maquette (cf. Fig.60). Elle rend compte du positionnement géographique des Unités Cartographiques de Sol et fait ressortir les caractéristiques principales des données des sondages en reprenant la même codification des variables « Type de sol », « Épaisseur », « Texture » et « Éléments grossiers ». Afin de positionner précisément les limites entre UCS en tenant compte notamment des particularités morphologiques observées lors du pastillage, la maquette est dressée à l'échelle du 1/25 000. Il faudra garder à l'esprit que le niveau de précision auquel on doit se référer demeure le 1/50 000.

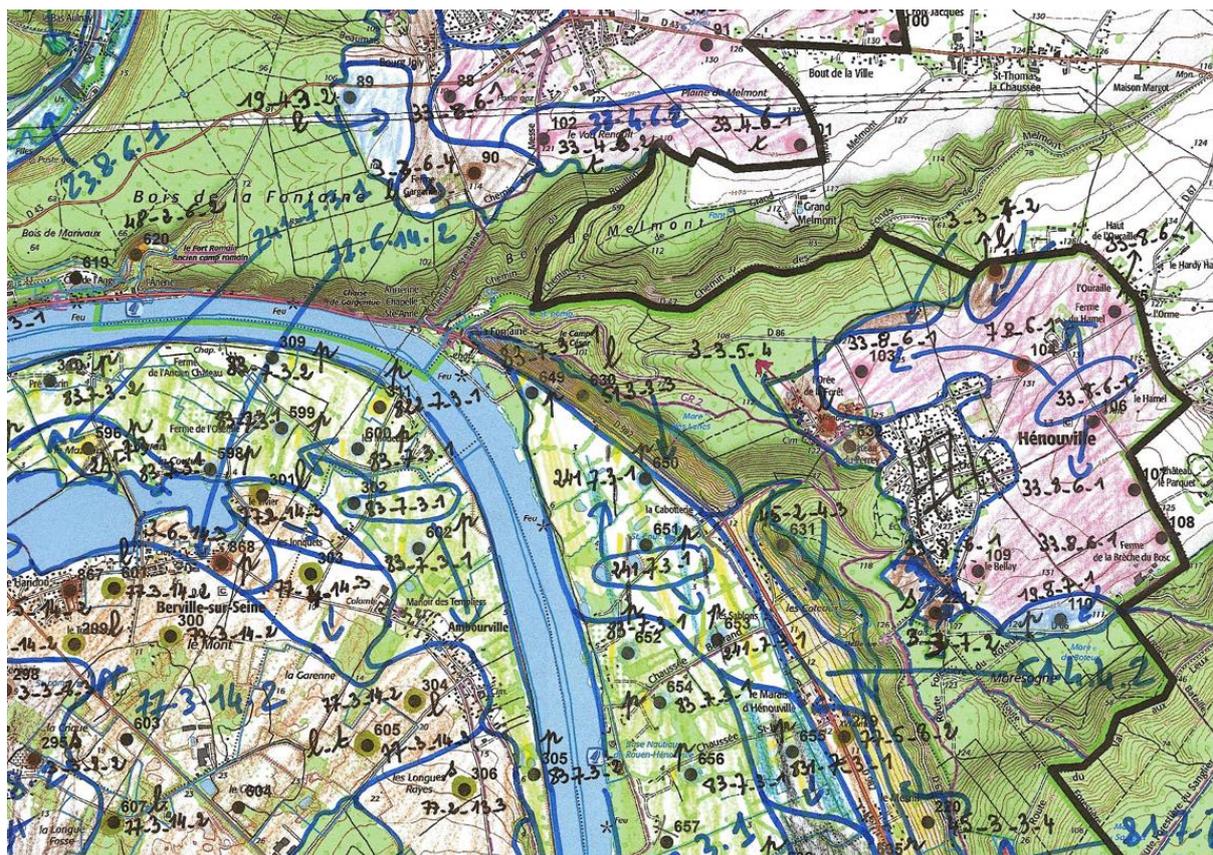


Fig. 60 : Exemple de résultats issus du maquetage

### La numérisation de la maquette

L'enjeu de la numérisation de la maquette sous SIG est double. Il s'agit à la fois de géoréférencer cette couche d'informations pour pouvoir la croiser avec d'autres données également géoréférencées et de construire une table attributaire qui associe à la couche graphique des UCS les caractéristiques pédologiques et édaphiques.

Le travail de report des limites et de renseignement de la table attributaire nécessite une attention de tous les instants pour obtenir un résultat à la hauteur des nombreuses modalités de valorisation qui en découlent. C'est la raison pour laquelle, au terme de cette démarche, nous avons procédé à un contrôle qualité au cours duquel nous avons relevé des imprécisions topologiques de la couche SIG initiale dédiée à la délimitation des zones A, N et AU.

L'exemple ci-dessous (cf. Fig.61) montre les cas de figure rencontrés et qui se manifestent par la présence de micro-polygones faisant la jonction entre deux polygones pertinents ou positionnés en recouvrement d'une limite d'une entité surfacique et par la présence de discontinuités entre des polygones normalement juxtaposés. Si cet état de fait n'a pas été préjudiciable pour dresser la carte des UCS, elle a posé des difficultés techniques par la suite pour réaliser les différentes modélisations qui ont exploité les données Sol.

Le résultat de la numérisation de la carte papier est présenté ci-dessous à propos des surfaces agricoles et naturelles (cf. Fig.62). Le zoom sur la partie cerclée permet de mieux percevoir le niveau de précision dans la délimitation des UCS (cf. Fig.63).

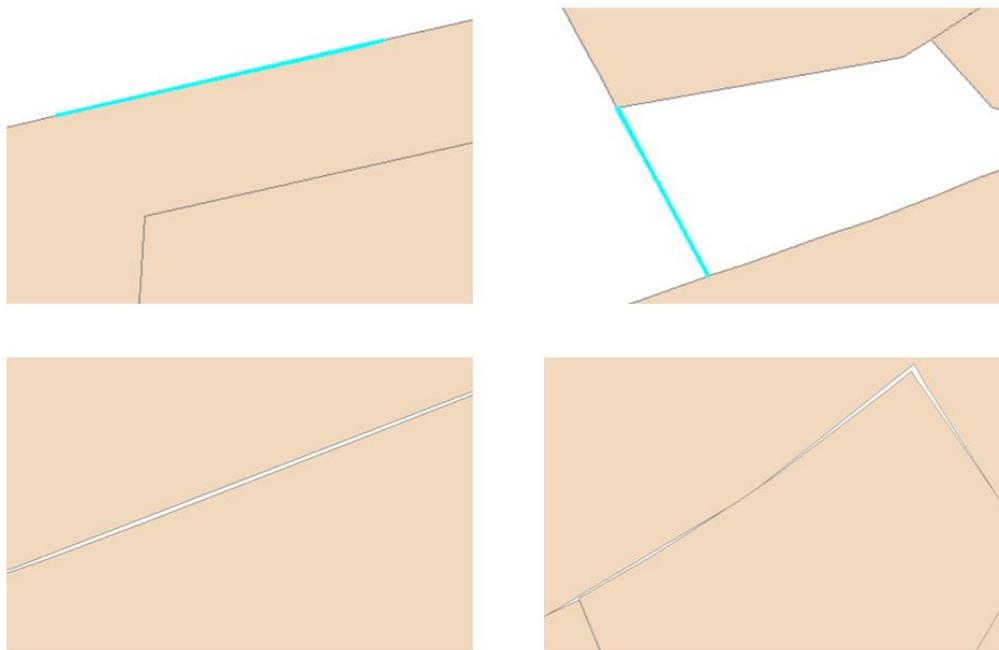


Fig. 61 : Exemples d'erreur topologique dans la couche SIG des zones A, N et AU

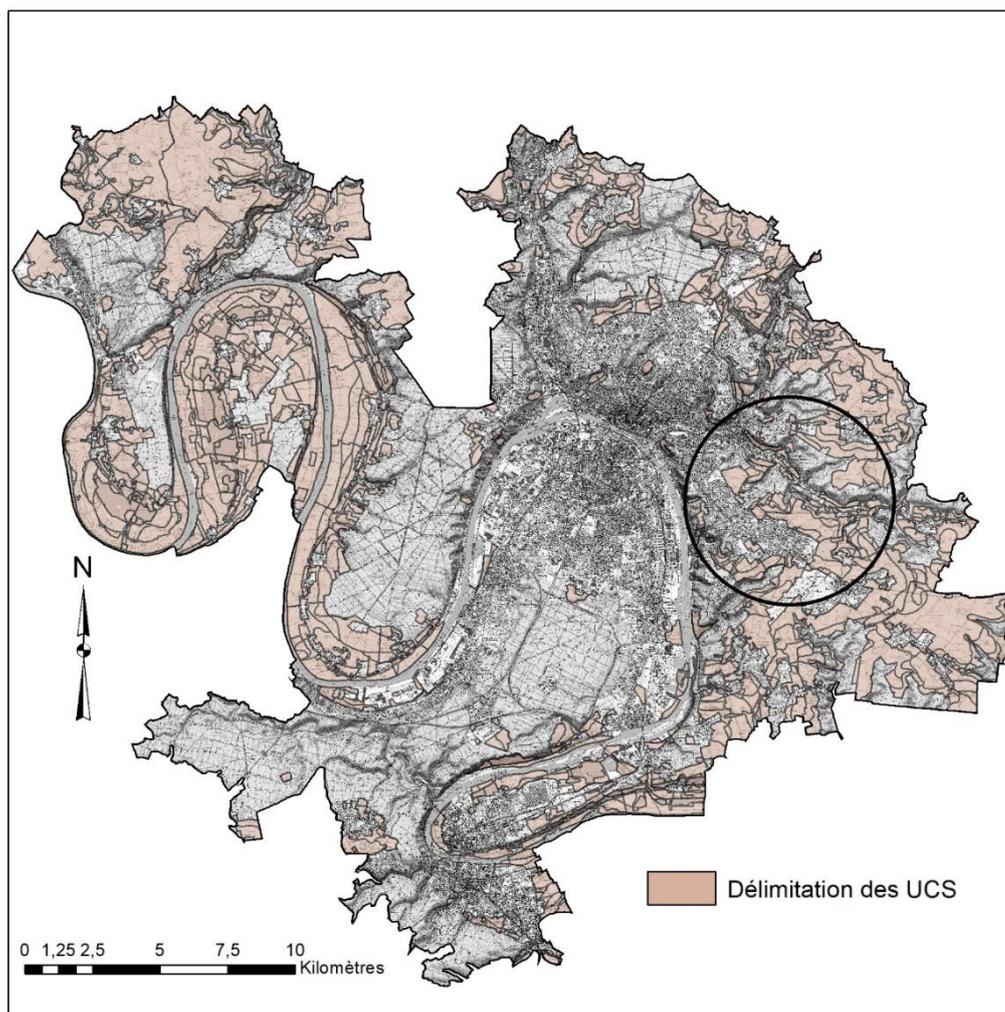


Fig. 62 : Digitalisation des UCS sur le territoire métropolitain

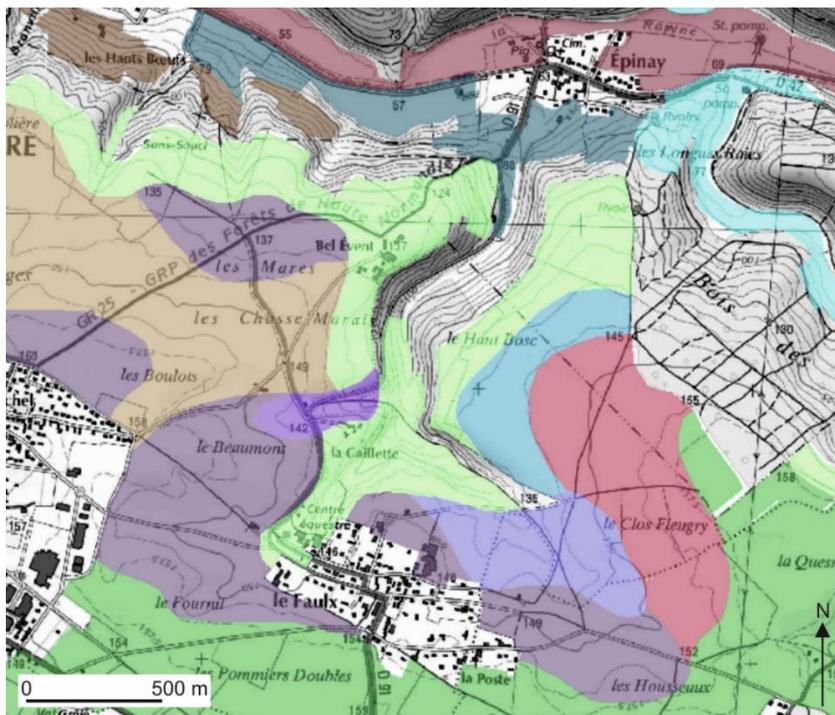


Fig. 63 : Exemple de précision de la numérisation des UCS

#### 1.1.4. Les rendus cartographiques

##### Les Unités Cartographiques de Sol

L'organisation morphologique sur le territoire de la MRN fait ressortir deux formes de relief principales comme l'atteste le document suivant (cf. Fig.64) : le plateau ondulé et le réseau de vallées. Nous reprendrons cette organisation pour présenter les UCS de plateau puis les UCS des vallées

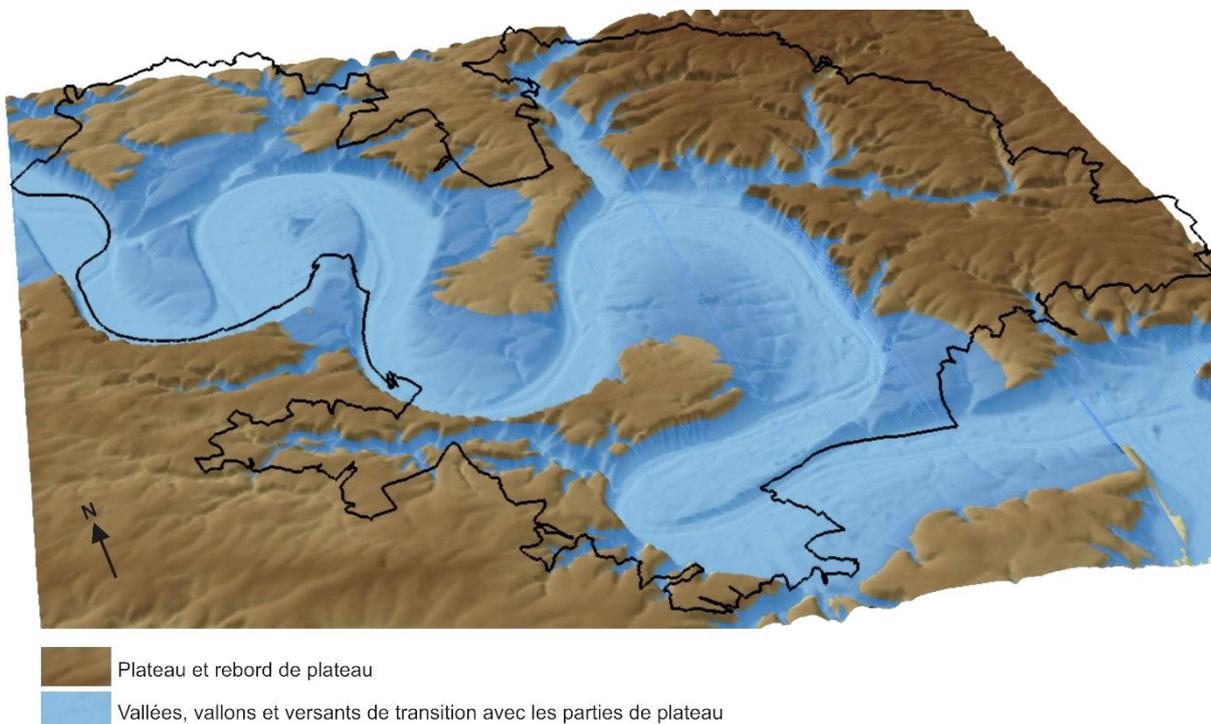
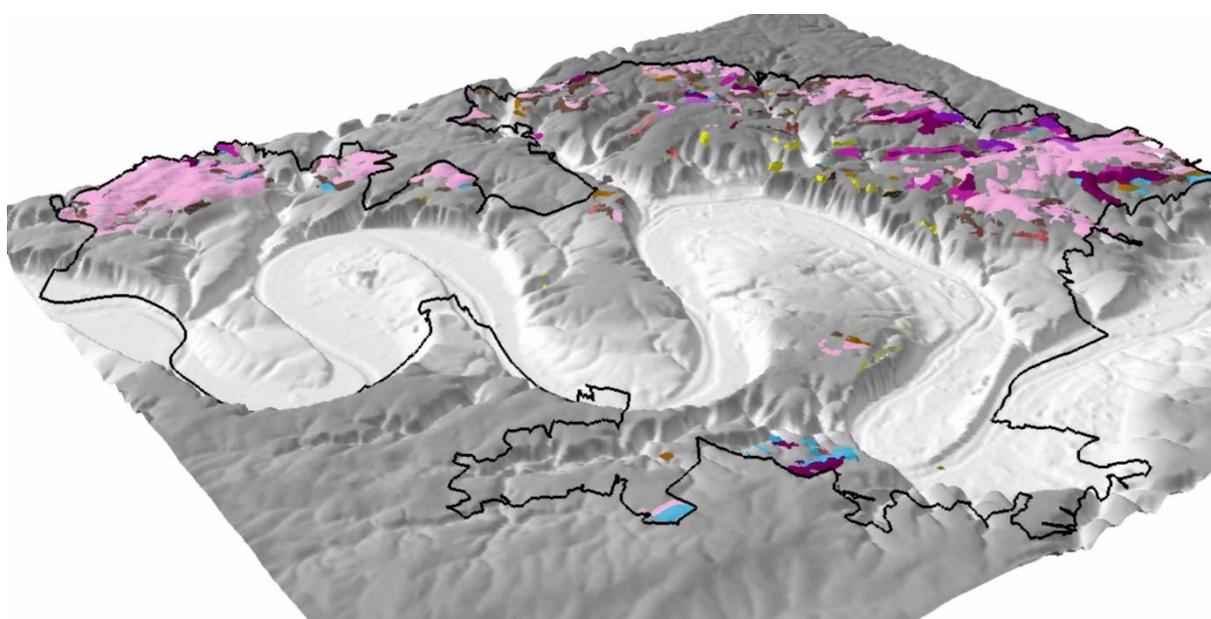


Fig. 64 : Organisation morphologique de la Métropole

## Les Unités Cartographiques de Sol en contexte de plateau.

L'illustration ci-dessous (cf. Fig.65) nous renseigne sur la nature des UCS et leur répartition en contexte de plateau. Nous nous attacherons ci-après à en décrire les principales unités.



<b>Sols bruns acides</b> ARENOSOL ARENOSOL à caractère rédoxique BRUNISOL BRUNISOL à caractère rédoxique BRUNISOL à horizon rédoxiq. de prof. BRUNISOL luviq. BRUNISOL ocreux BRUNISOL-REDOXISOL PEYROSOL RANKOSOL	<b>Sols colluviaux</b> CALCISOL colluvial à caractère rédoxique CALCOSOL colluvial COLLUVIOSOL COLLUVIOSOL à caractère rédoxique COLLUVIOSOL à horizon rédoxique de profondeur COLLUVIOSOL carbonaté COLLUVIOSOL-REDOXISOL	<b>Sols fluviqes</b> ARENOSOL fluviq. calcique ARENOSOL fluviq. carbonaté BRUNISOL fluviq. CALCISOL fluviq. CALCOSOL fluviq. CALCOSOL fluviq. à horizon rédoxiq. de prof. CALCOSOL fluviq. à caractère rédoxique RENDOSOL fluviq.	<b>Sols hydromorphes</b> HISTOSOL HISTOSOL recouvert REDOXISOL REDOXISOL bathyhistique carbonaté REDOXISOL calcique colluvial REDOXISOL carbonaté
<b>Sols bruns carbonatés</b> ARENOSOL carbonaté CALCISOL CALCOSOL RENDISOL RENDISOL colluvial RENDOSOL	<b>Sols lessivés et lessivés hydromorphes</b> LUVISOL LUVISOL-REDOXISOL LUVISOL-REDOXISOL dégradé NEOLUVISOL NEOLUVISOL colluvial NEOLUVISOL à caractère rédoxique NEOLUVISOL à horizon rédoxique de profondeur NEOLUVISOL-REDOXISOL NEOLUVISOL-REDOXISOL colluvial	<b>Sols fluviqes hydromorphes</b> REDOXISOL fluviq. REDOXISOL fluviq. brunifié REDOXISOL fluviq. calcique REDOXISOL fluviq. carbonaté REDOXISOL fluviq. carbonaté histique REDOXISOL fluviq. à caractère réducteur REDOXISOL fluviq. à caractère réducteur carbonaté REDOXISOL fluviq. à horizon histique	<b>Sols anthropiques</b> ANTHROPOSOL artificiel CALCOSOL anthropisé

Fig. 65 : Les UCS en contexte de plateau

- Les sols lessivés et lessivés hydromorphes (palette chromatique du jaune au violet)

Les NEOLUVISOLS, ou sols faiblement lessivés, représentent incontestablement l'unité de sol la plus répandue dans ce type de situation topographique (cf. Fig.66). Il s'agit de sols non hydromorphes quand les conditions permettent un drainage naturel du terrain. Dans le cas contraire, en présence d'une pente nulle ou concave, d'un horizon de profondeur argileux peu perméable, de la proximité des argiles à silex avec la base du sol ou la combinaison de tout ou partie de ces facteurs, le lessivage s'accompagne d'une hydromorphie qui atteste un engorgement en eau durable au cours de l'année. En présence d'une hydromorphie modérée (fer ferrique) et située en profondeur, on parlera de NÉOLUVISOLS à horizon rédoxique de profondeur. Lorsque cette forme d'hydromorphie est plus

présente dans le profil en apparaissant dès l'horizon intermédiaire, on parlera de NÉOLUVISOLS à caractère rédoxique. Enfin, lorsque cette hydromorphie se manifeste sur tout le profil en raison de conditions de drainage très insuffisantes, on parlera de NÉOLUVISOLS-RÉDOXISOLS (cf. Fig.67).

Les sols faiblement lessivés non hydromorphes et les sols lessivés hydromorphes couvrent plus de 90% des surfaces de plateau en zone A, N et AU. On les retrouve sous forme de grandes Unités Cartographiques sur les communes d'Épinay-sur-Duclair, de Saint-Paër, d'Hérouville, de Saint-Jacques-sur-Darnetal et de Saint-Aubin-Épinay.

Les sols lessivés hydromorphes (LUVISOLS à caractère rédoxique et LUVISOLS-REDOXISOLS) sont une déclinaison des sols précédents (cf. Fig.68). Le lessivage des argiles est plus marqué et favorise la formation d'un horizon de profondeur peu perméable à l'origine d'un engorgement en eau durable permettant l'installation d'une hydromorphie sur tout ou partie du profil de sol. Ces profils recouvrent de petites surfaces sur Saint-Jacques-sur-Darnetal et Montmain.

	<p><b>Fosse 378</b> : NÉOLUVISOL sur limons de plateau. Commune : Les Authieux-sur-le-Port-Saint-Ouen.</p> <p>Il s'agit de sols le plus souvent cultivés, épais, sains et faiblement lessivés qui se sont développés sur les limons de plateau.</p> <p>Ils sont composés de 3 horizons. 0 - 30 cm : horizon de surface brun foncé, limoneux 30 – 45 cm : horizon intermédiaire brun clair, limoneux, appauvri en argiles granulométriques 45 – 110 cm : horizon de profondeur brun orangé, limono-argileux, enrichi en argiles granulométriques.</p> <p>Ces sols sont localisés sur les parties les plus hautes des interfluves, sur pentes légèrement drainantes et convexes et qui ne sont pas soumis à l'influence des argiles à silex imperméables sur lesquelles les limons se sont déposés.</p> <p>Les horizons présentent une structure pédique de type polyédrique à polyédrique sub-anguleuse et sont dépourvus d'éléments grossiers.</p>
<p>Les analyses physico-chimiques indiquent des pH neutres à légèrement alcalins en raison de la pratique du chaulage, des teneurs en matières organiques inférieures à 2% pour l'horizon de surface, une capacité assez faible à fixer les nutriments, une bonne minéralisation du carbone organique et une <b>sensibilité très forte à l'instabilité structurale et au risque de battance rendant la partie supérieure de ces sols particulièrement érodible.</b></p>	

Fig. 66 : Exemple de NÉOLUVISOL sur limons de plateau, fosse ID 378

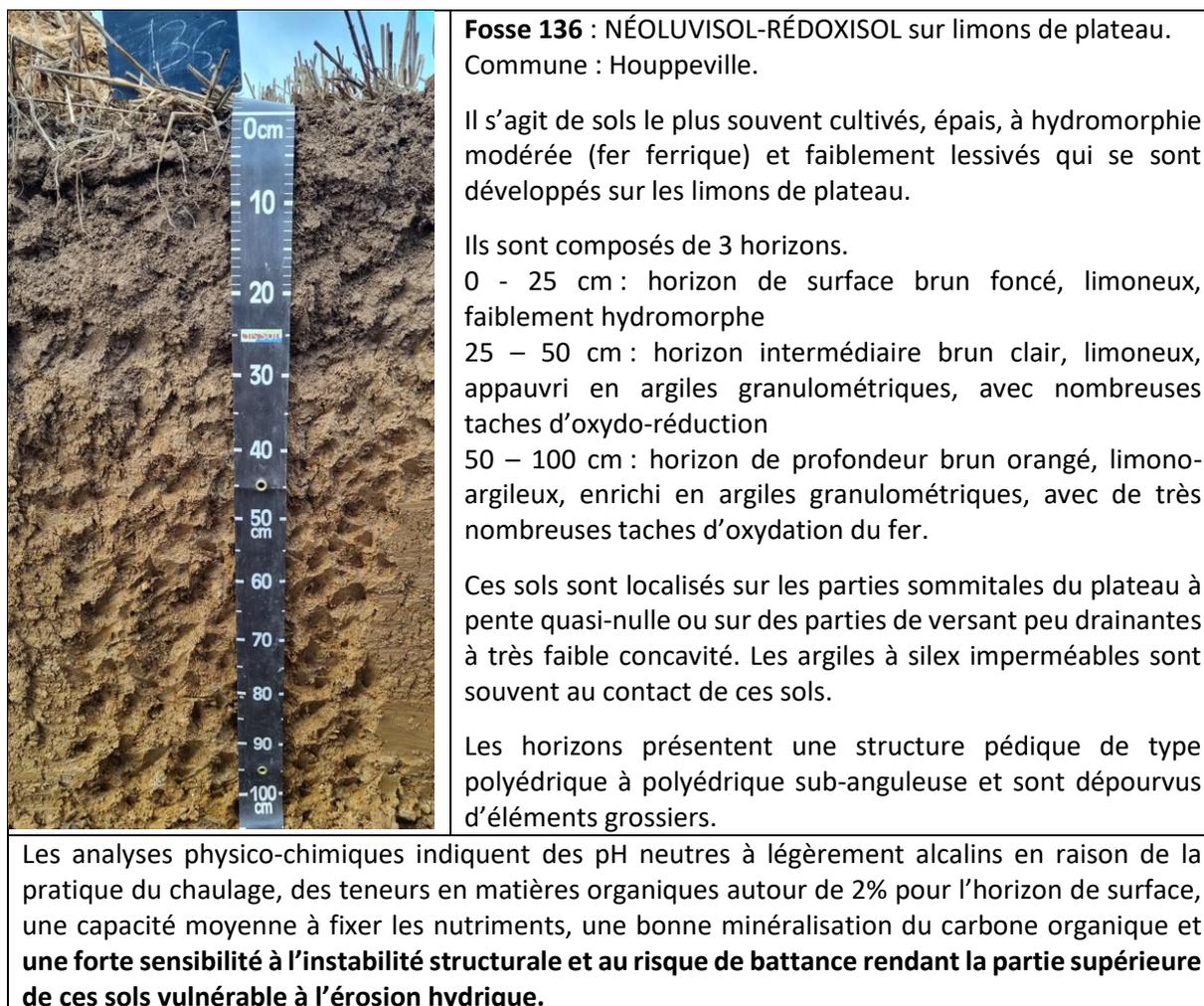


Fig. 67 : Exemple de NÉOLUVISOL-RÉDOXISOL sur limons de plateau, fosse ID 136



Fig. 68 : Exemple de LUVISOL à caractère rédoxique sur limons de plateau, fosse ID 13

- Les sols bruns, hydromorphes et alcalins de rebord de plateau (sur la carte des sols, palette chromatique relative au jaune pâle, jaune, ocre, brun, brun rouge, bleu grisâtre, vert opaline clair, gris clair).

Les rebords de plateau se caractérisent par des versants à morphologie convexe et à déclivité marquée. Ces secteurs ont renforcé l'action de l'érosion hydrique qui a progressivement décapé les placages des limons éoliens et exhumé les argiles à silex sous-jacents. Lorsque les limons éoliens ont été très partiellement conservés en formant une fine couverture sur les argiles à silex et que la pente est drainante, la pédogenèse va favoriser la présence de BRUNISOLS que l'on retrouve par exemple à Saint-Paër ou Isneauville. Toutefois, la faible profondeur d'apparition des argiles à silex imperméables peut rapidement générer des conditions hydromorphes à la faveur de versants moins drainants. Les BRUNISOLS sont alors remplacés par des BRUNISOLS à caractère rédoxique (cf. Fig.69) ou par des RÉDOXISOLS. C'est ce que nous avons observé régulièrement sur La Londe ou La Neuville-Chant-d'Oisel.

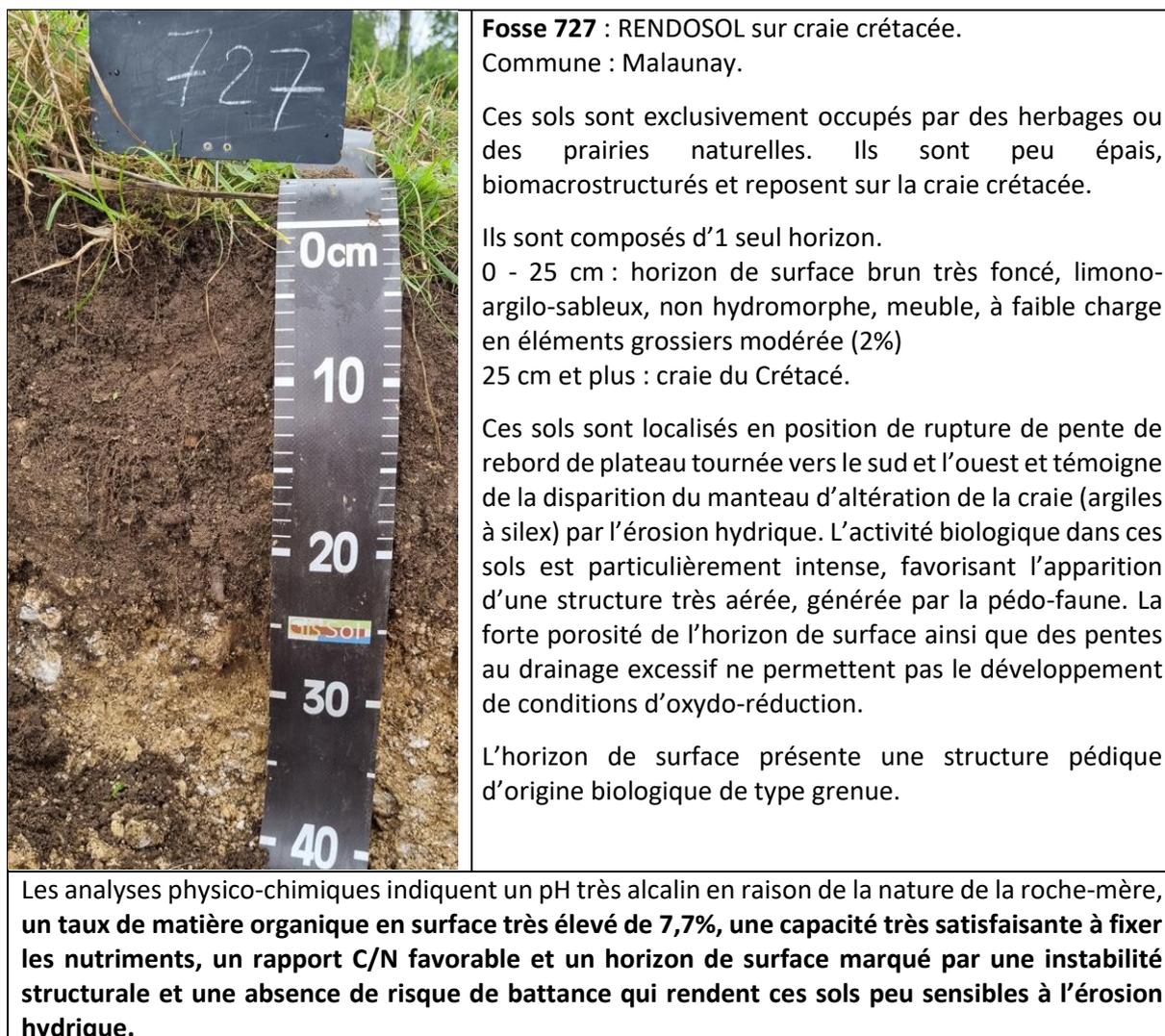
Dans les contextes les plus érosifs (Fontaine-sous-Préaux), les limons éoliens cèdent la place aux argiles à silex. Les sols associés (RANKOSOLS à substrat meuble) sont acides, peu épais, argileux et souvent à forte charges en éléments grossiers (cf. Fig.70). En situation de rebord de plateau marqué par une rupture de pente brutale, que l'on retrouve souvent en périphérie de plateau exposée sud et ouest (Amfreville-la-Mi-Voie, Belbeuf, le Mesnil-Esnard), les argiles à silex ont été décapées à leur tour. La craie initialement sous-jacente est alors affleurante. Compte tenu de la nature de la roche et d'une topographie érosive qui ne permet pas le développement durable des sols (on parle de sols d'érosion), la pédogenèse se traduit par des sols carbonatés de faible épaisseur appelés RENDOSOLS (cf. Fig.71).

	<p><b>Fosse 33</b> : BRUNISOL à caractère rédoxique sur argiles à silex. Commune : Sainte-Marguerite-sur-Duclair.</p> <p>Il s'agit de sols le plus souvent cultivés, assez épais, à hydromorphie modérée, développés sur des placages relictuels de limons éoliens reposant sur les argiles à silex situées proches de la surface.</p> <p>Ils sont composés de 3 horizons. 0 - 35 cm : horizon de surface brun foncé, limoneux, non hydromorphe, meuble 35 - 50 cm : horizon intermédiaire brun, limoneux, non hydromorphe, assez compact 50 - 75 cm : horizon de profondeur brun clair, limoneux, à hydromorphie modérée, assez compact, à très faible charge en éléments grossiers.</p> <p>Ces sols sont localisés en position d'amorce de rebord de plateau et témoigne de la disparition progressive des limons de plateau au profit des argiles à silex. Ils sont issus des limons éoliens mais sont soumis au caractère imperméable des argiles à silex en présence de pente peu drainante.</p> <p>Les horizons présentent une structure pédique de type polyédrique.</p>
<p>Les analyses physico-chimiques indiquent un pH neutre sur l'ensemble du profil, un taux de matière organique en surface de 2,5%, une capacité assez faible à fixer les nutriments, un rapport C/N favorable et un horizon de surface marqué par une <b>très forte instabilité structurale et un risque de battance qui rendent ces sols sensibles à l'érosion hydrique.</b></p>	

Fig. 69 : Exemple de BRUNISOL à caractère rédoxique sur argiles à silex, fosse ID 33



Fig. 70 : Exemple de RANKOSOL à substrat meuble sur argiles à silex, fosse ID 133



**Fosse 727** : RENDOSOL sur craie crétacée.  
Commune : Malaunay.

Ces sols sont exclusivement occupés par des herbages ou des prairies naturelles. Ils sont peu épais, biomacrostructurés et reposent sur la craie crétacée.

Ils sont composés d'1 seul horizon.

0 - 25 cm : horizon de surface brun très foncé, limono-argilo-sableux, non hydromorphe, meuble, à faible charge en éléments grossiers modérée (2%)

25 cm et plus : craie du Crétacé.

Ces sols sont localisés en position de rupture de pente de rebord de plateau tournée vers le sud et l'ouest et témoigne de la disparition du manteau d'altération de la craie (argiles à silex) par l'érosion hydrique. L'activité biologique dans ces sols est particulièrement intense, favorisant l'apparition d'une structure très aérée, générée par la pédo-faune. La forte porosité de l'horizon de surface ainsi que des pentes au drainage excessif ne permettent pas le développement de conditions d'oxydo-réduction.

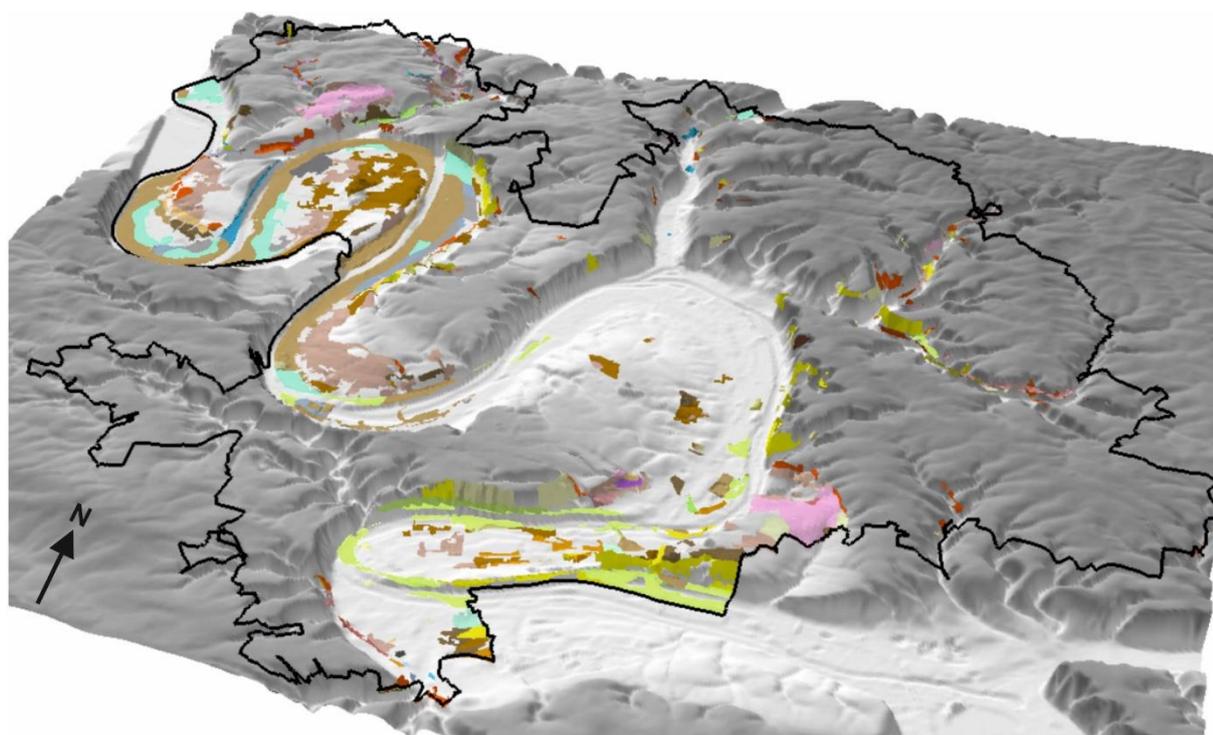
L'horizon de surface présente une structure pédique d'origine biologique de type grenue.

Les analyses physico-chimiques indiquent un pH très alcalin en raison de la nature de la roche-mère, **un taux de matière organique en surface très élevé de 7,7%**, **une capacité très satisfaisante à fixer les nutriments**, **un rapport C/N favorable** et **un horizon de surface marqué par une instabilité structurale et une absence de risque de battance qui rendent ces sols peu sensibles à l'érosion hydrique.**

Fig. 71 : Exemple de RENDOSOL sur craie crétacée, fosse ID 727

## Les Unités Cartographiques de Sol en contexte de vallée.

En contexte de vallée, les UCS sont étroitement associées à la nature et l'âge des dépôts alluviaux d'une part, et au processus de colluvionnement dont les modalités diffèrent selon l'exposition des versants d'autre part (cf. Fig.72). Nous décrivons les principales unités cartographiques selon ces éléments de distinction.



<p><b>Sols bruns acides</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ARENOSOL</li> <li>ARENOSOL à caractère rédoxique</li> <li>BRUNISOL</li> <li>BRUNISOL à caractère rédoxique</li> <li>BRUNISOL à horizon rédoxique de prof.</li> <li>BRUNISOL fluviq.</li> <li>BRUNISOL ocreux</li> <li>BRUNISOL-REDOXISOL</li> <li>PEYROSOL</li> <li>RANKOSOL</li> </ul>	<p><b>Sols colluviaux</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>CALCISOL colluvial à caractère rédoxique</li> <li>CALCOSOL colluvial</li> <li>COLLUVIOSOL</li> <li>COLLUVIOSOL à caractère rédoxique</li> <li>COLLUVIOSOL à horizon rédoxique de profondeur</li> <li>COLLUVIOSOL carbonaté</li> <li>COLLUVIOSOL-REDOXISOL</li> </ul>	<p><b>Sols fluviq.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ARENOSOL fluviq. calcique</li> <li>ARENOSOL fluviq. carbonaté</li> <li>BRUNISOL fluviq.</li> <li>CALCISOL fluviq.</li> <li>CALCOSOL fluviq.</li> <li>CALCOSOL fluviq. à horizon rédoxique de prof.</li> <li>CALCOSOL fluviq. à caractère rédoxique</li> <li>RENDOSOL fluviq.</li> </ul>	<p><b>Sols hydromorphes</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>HISTOSOL</li> <li>HISTOSOL recouvert</li> <li>REDOXISOL</li> <li>REDOXISOL bathyhistique carbonaté</li> <li>REDOXISOL calcique colluvial</li> <li>REDOXISOL carbonaté</li> </ul>
<p><b>Sols bruns carbonatés</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ARENOSOL carbonaté</li> <li>CALCISOL</li> <li>CALCOSOL</li> <li>RENDISOL</li> <li>RENDISOL colluvial</li> <li>RENDOSOL</li> </ul>	<p><b>Sols lessivés et lessivés hydromorphes</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>LUVISOL</li> <li>LUVISOL-REDOXISOL</li> <li>LUVISOL-REDOXISOL dégradé</li> <li>NEOLUVISOL</li> <li>NEOLUVISOL colluvial</li> <li>NEOLUVISOL à caractère rédoxique</li> <li>NEOLUVISOL à horizon rédoxique de profondeur</li> <li>NEOLUVISOL-REDOXISOL</li> <li>NEOLUVISOL-REDOXISOL colluvial</li> </ul>	<p><b>Sols fluviq. hydromorphes</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>REDOXISOL fluviq.</li> <li>REDOXISOL fluviq. brunifié</li> <li>REDOXISOL fluviq. calcique</li> <li>REDOXISOL fluviq. carbonaté</li> <li>REDOXISOL fluviq. carbonaté histique</li> <li>REDOXISOL fluviq. à caractère réductique</li> <li>REDOXISOL fluviq. à caractère réductique carbonaté</li> <li>REDOXISOL fluviq. à horizon histique</li> </ul>	<p><b>Sols anthropiques</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ANTHROPOSOL artificiel</li> <li>CALCOSOL anthropisé</li> </ul>

Fig. 72 : Les UCS en contexte de vallée

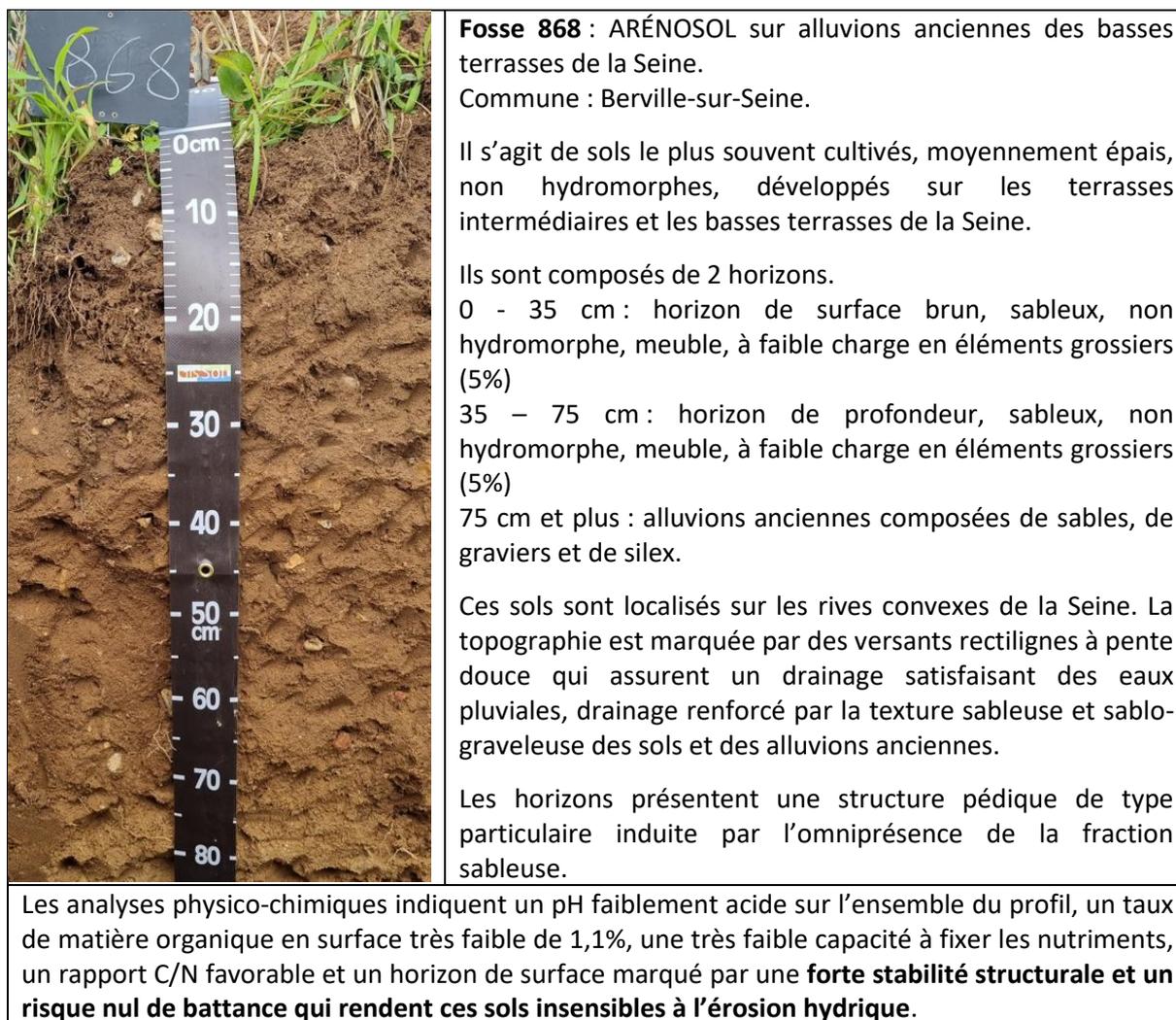
- Les sols issus des alluvions anciennes et récentes (palette chromatique composée du vert opaline, vert pistache, vert olive, vert d'eau)

Les sols développés sur les alluvions anciennes et récentes sont intimement liés à la nature et l'âge des dépôts. Une première distinction peut être faite entre les sols issus des alluvions anciennes et ceux qui se sont formés sur alluvions récentes.

Les alluvions anciennes témoignent de la présence d'anciennes terrasses alluviales de la Seine aujourd'hui en grande partie démantelées par l'érosion hydrique et les dynamiques de solifluxion. Ces dépôts quaternaires sont composés de silts, de sables et de silex dans des proportions qui varient selon l'âge des alluvions. Les alluvions anciennes des plus hautes terrasses s'apparentent à un matériel sablo-graveleux à forte charge en silex. Celles des terrasses intermédiaires sont composées d'une fraction sableuse à sablo-limoneuse dominante et d'une charge en silex modérée. Les alluvions des basses terrasses sont associées à un matériel limono-sableux à faible charge en silex. Si les alluvions anciennes ont été largement remaniées par les dynamiques gravitaires, il n'en reste pas moins que l'on retrouve ces signatures granulométriques dans la description des sols qu'elles portent.

**Les sols sableux ou ARÉNOSOLS constituent indéniablement l'unité de sol la plus représentative des sols issus des alluvions anciennes** (cf. Fig.73). Lorsque la fraction sableuse diminue légèrement au profil des limons, la texture des sols devient limono-sableuse et entraîne un **reclassement de l'ARÉNOSOL en BRUNISOL**. Ponctuellement, des lentilles de tourbe se sont immiscées dans les alluvions anciennes des basses terrasses, ce qui se manifeste par des sols organiques surmontés parfois d'une faible épaisseur de sédiments alluviaux que l'on appelle HISTOSOL recouvert (cf. Fig.74).

Les alluvions récentes qui tapissent le lit majeur actuel de la Seine et que l'on retrouve également dans le fond des vallées secondaires présentent une composition granulométrique très différente. Le matériel est limoneux ou argileux, souvent carbonaté et dépourvu d'éléments grossiers. Les sols sur alluvions récentes témoignent des marqueurs de l'oxydo-réduction en raison de l'absence de pentes drainantes et d'un régime hydrique alimenté par les nappes alluviales tout ou partie de l'année. En raison de l'alcalinité des horizons pédologiques, le potentiel redox s'exprime peu, ce qui doit inciter le pédologue à redoubler de vigilance et d'attention pour bien relever la présence de l'hydromorphie. Dans ce contexte, les RÉDOXISOLS fluviatiques carbonatés représentent l'unité cartographique majoritaire (cf. Fig.75).



**Fosse 868** : ARÉNOSOL sur alluvions anciennes des basses terrasses de la Seine.

Commune : Berville-sur-Seine.

Il s'agit de sols le plus souvent cultivés, moyennement épais, non hydromorphes, développés sur les terrasses intermédiaires et les basses terrasses de la Seine.

Ils sont composés de 2 horizons.

0 - 35 cm : horizon de surface brun, sableux, non hydromorphe, meuble, à faible charge en éléments grossiers (5%)

35 - 75 cm : horizon de profondeur, sableux, non hydromorphe, meuble, à faible charge en éléments grossiers (5%)

75 cm et plus : alluvions anciennes composées de sables, de graviers et de silex.

Ces sols sont localisés sur les rives convexes de la Seine. La topographie est marquée par des versants rectilignes à pente douce qui assurent un drainage satisfaisant des eaux pluviales, drainage renforcé par la texture sableuse et sablo-graveleuse des sols et des alluvions anciennes.

Les horizons présentent une structure pédique de type particulière induite par l'omniprésence de la fraction sableuse.

Les analyses physico-chimiques indiquent un pH faiblement acide sur l'ensemble du profil, un taux de matière organique en surface très faible de 1,1%, une très faible capacité à fixer les nutriments, un rapport C/N favorable et un horizon de surface marqué par une **forte stabilité structurale et un risque nul de battance qui rendent ces sols insensibles à l'érosion hydrique.**

Fig. 73 : Exemple d'ARÉNOSOL sur alluvions anciennes des basses terrasses de la Seine, fosse ID 868

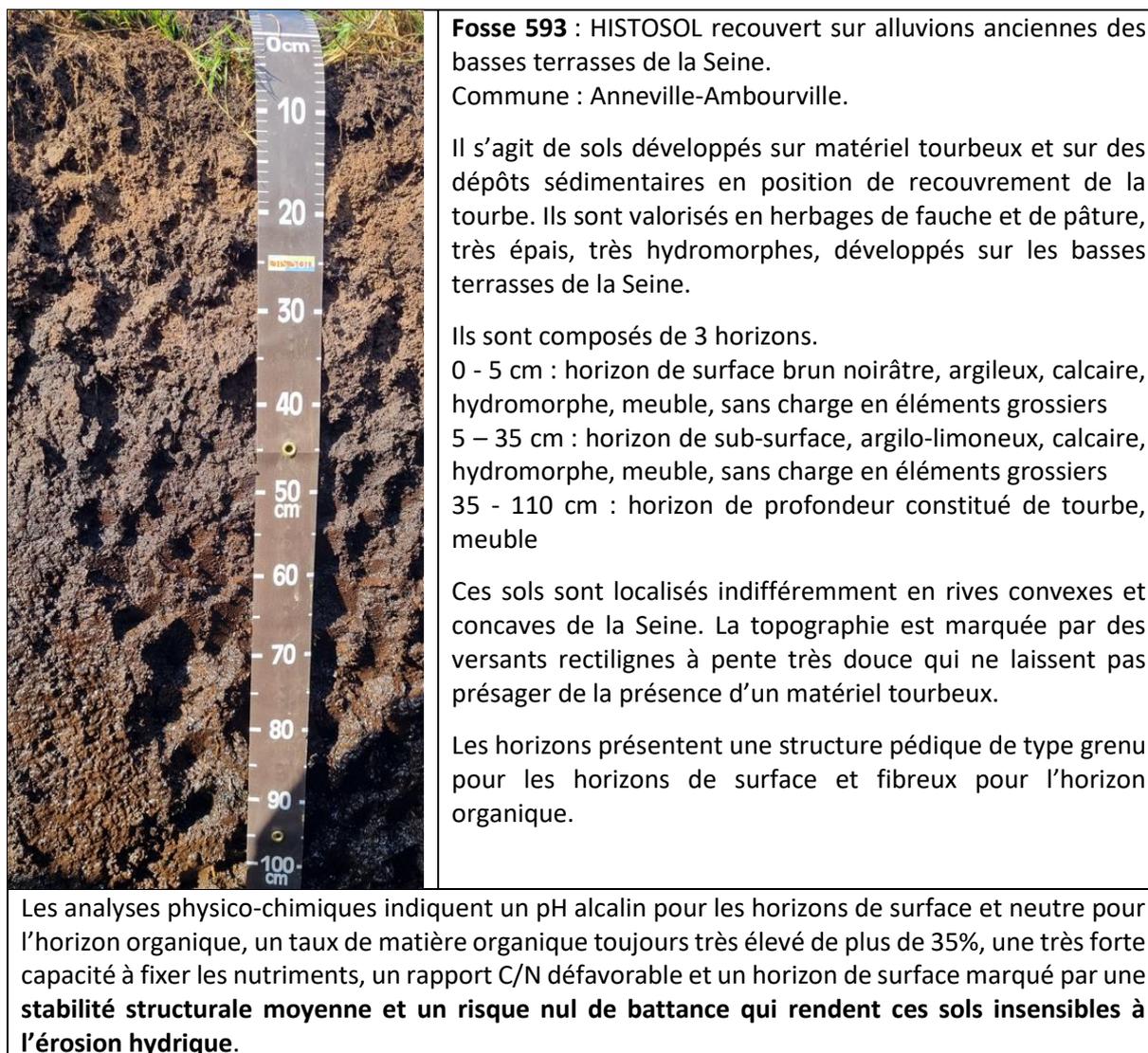


Fig. 74 : Exemple d'HISTOSOL recouvert sur alluvions anciennes des basses terrasses de la Seine, fosse ID 593



Fig. 75 : Exemple de RÉDOXISOL fluviatique pachique carbonaté sur alluvions récentes de la Seine, fosse ID 691

- Les sols issus des colluvions de versant (palette chromatique composée du jaune safran, rose dragée clair, rose saumon et rouge vermillon)

La jonction entre le plateau et les vallées principales est assurée par des versants dont la déclivité et l'exposition conditionnent l'importance et la nature du matériel colluvial. Ces formations de solifluxion se sont mises en place pendant les périodes humides du Quaternaire. Elles recouvrent en de nombreux endroits les couches crayeuses du Crétacé.

Sur les versants tournés vers le nord et l'est, généralement moins pentus que ceux exposés sud et ouest, les colluvions sont issues du démantèlement et du transport des limons de plateau, parfois mélangés en faible quantité aux argiles à silex concernés également par cette dynamique d'érosion gravitaire. Dans ce contexte, les COLLUVIOSOLS sont acides, épais, limoneux et modérément hydromorphes en situation de replat topographique ou sur les bas de versant concaves peu drainants (cf. Fig.76).

Sur les versants sud et ouest, lorsque la déclivité des versants ne traduit pas la présence d'abrupts, les colluvions sont moins épaisses. Elles sont constituées des limons issus du plateau mélangés à des éléments aussi fins provenant de l'altération de la craie. Les COLLUVIOSOLS seront alors soit calciques

soit calcaires (cf. Fig.77). Il s'agit de sols généralement épais, de l'ordre du mètre, filtrants, sains et contenant une charge en éléments grossiers (silex) assez faible.



**Fosse 466** : COLLUVIOSOL sur colluvions quaternaires.  
Commune : Saint-Léger-du-Bourg-Denis.

Il s'agit de sols voués aux herbages en raison de la pente qui rend difficile ou impossible les travaux mécaniques agricoles. Ils sont moyennement épais à épais, sains sur les pentes drainantes, acides, à texture corrélée à la nature des colluvions.

Ils sont composés de 2 horizons.

0 - 20 cm : horizon de surface brun foncé, limono-argileux, acide, non hydromorphe et à faible charge en éléments grossiers de type silex (5%)

20 – 55 cm : horizon de profondeur brun orangé, limono-argilo-sableux, acide, non hydromorphe et à forte charge en éléments grossiers de type silex (60%).  
55 cm et plus : argiles à silex solifluée supportant le sol colluvial

Ces sols recouvrent les versants généralement tournés vers le nord et l'est. L'association de sédiments relevant des limons de plateau et des argiles à silex soliflués se traduit par des sols à texture équilibrée (LAS). La présence d'une charge caillouteuse significative accroît la capacité de drainage de ces sols.

Les horizons présentent une structure pédique de type grenu en surface et polyédrique en profondeur.

Les analyses physico-chimiques indiquent un pH très acide sur l'ensemble du profil, un taux de matière organique assez élevé de 3,5% pour l'horizon organo-minéral, une forte capacité à fixer les nutriments, un rapport C/N favorable et un horizon de surface marqué par **une faible stabilité structurale et un risque nul de battance qui rendent ces sols peu sensibles à l'érosion hydrique.**

Fig. 76 : Exemple de COLLUVIOSOL sur colluvions quaternaires, fosse ID 466

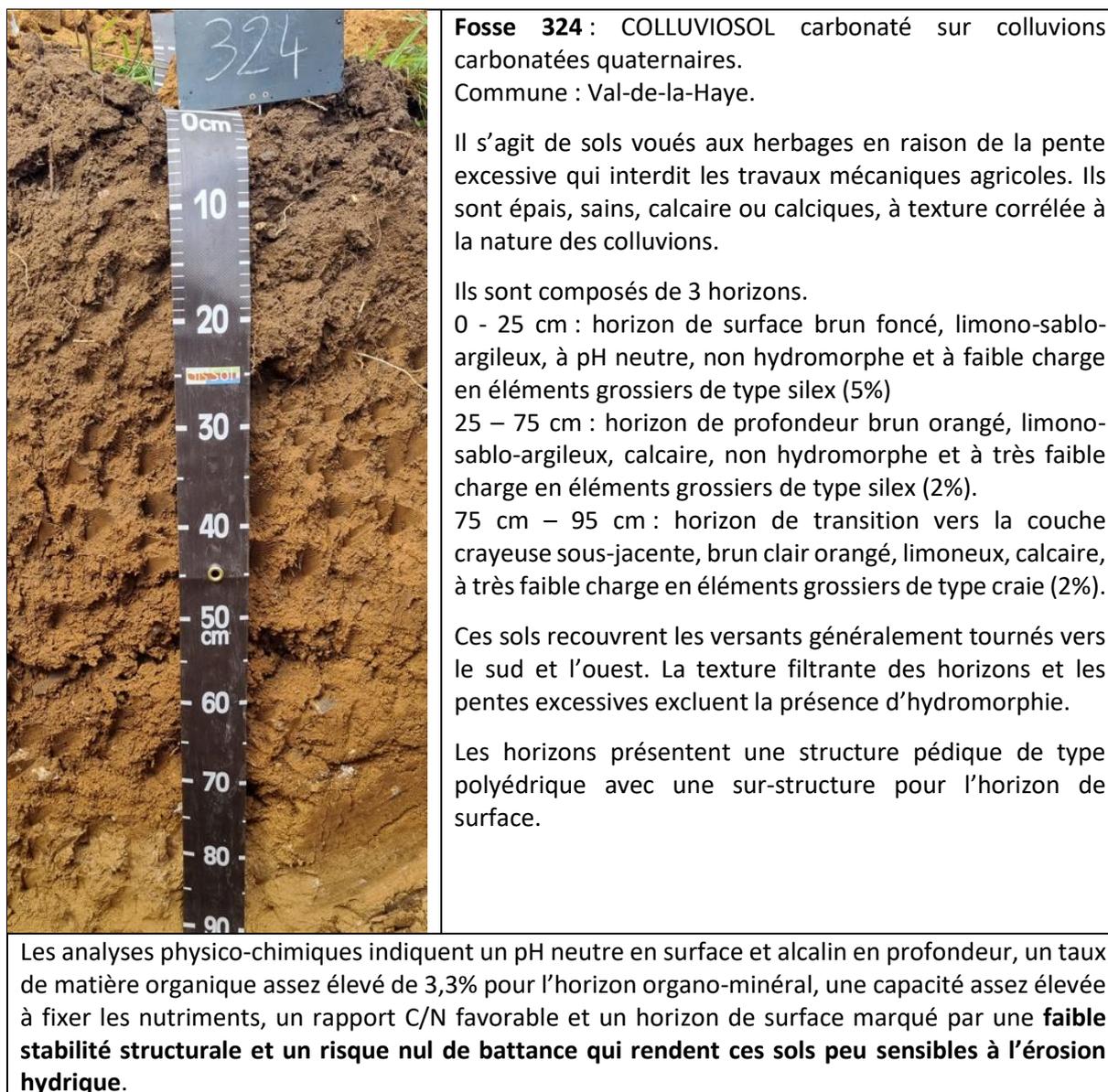


Fig. 77 : Exemple de COLLUVIOSOL carbonaté sur colluvions carbonatées quaternaires, fosse ID 324

## Typologie des UCS en zones A, N et AU

Le territoire de la Métropole Rouen Normandie atteste une forte diversité pédologique retranscrite sur le document suivant (cf. Fig.78). Au total, 56 Unités Cartographiques de Sol ont été recensées en Zones A, N et AU. Elles ont été regroupées en 8 classes exprimant la pédogenèse (carbonatation, décarbonatation, brunification, lessivage, hydromorphie), le caractère alluvial et colluvial des matériaux et l'impact de l'homme sur la transformation des profils initiaux (anthropisation). A noter que les zones NB et NA du PLU n'ont pas été prospectées et cartographiées car elle sont déjà protégées dans le PLU.

Le graphique de distribution des UCS réunis dans ces 8 classes indique la forte représentation des sols développés sur les limons éoliens (cf. Fig.79). Il s'agit des sols lessivés (lessivage des argiles sous l'effet du drainage des eaux pluviales) et lessivés hydromorphes (engorgement en eau du sol pendant une grande partie de l'année venant se rajouter au lessivage). Leur taux de couverture spatiale est estimé à 41%, ce qui représente 9 749 ha. On retrouve ensuite par ordre d'importance en termes de superficie

les sols bruns acides. Il s'agit de sols bien drainés et non calcaires qui libèrent en quantité suffisante de l'argile et des oxydes de fer. Ils représentent 24% des surfaces cartographiées soit 5 634 ha. Les sols hydromorphes issus des alluvions arrivent ensuite avec un taux de couverture de 14% (3 204 ha).

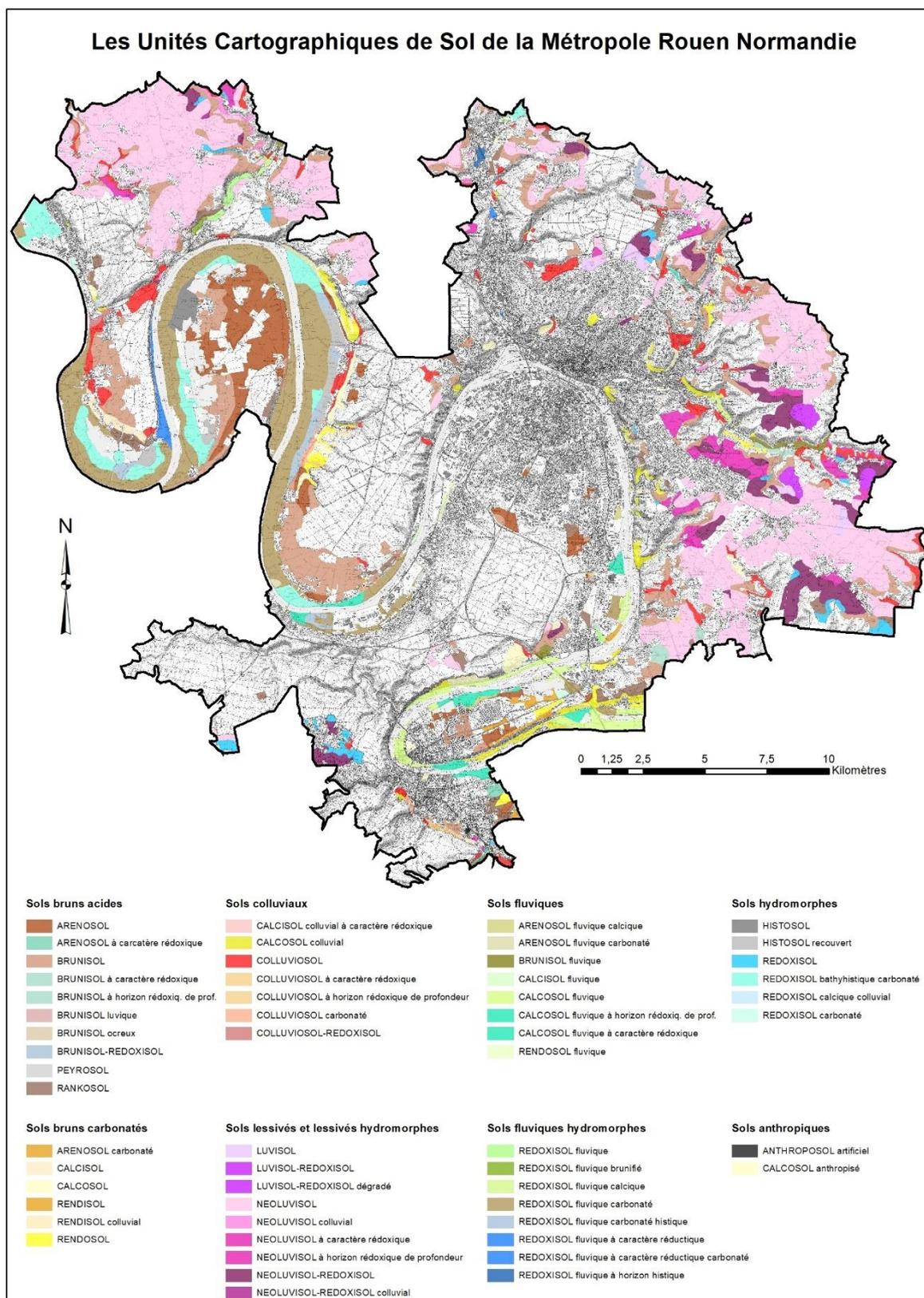


Fig. 78 : Les UCS sur le territoire de la Métropole Rouen Normandie

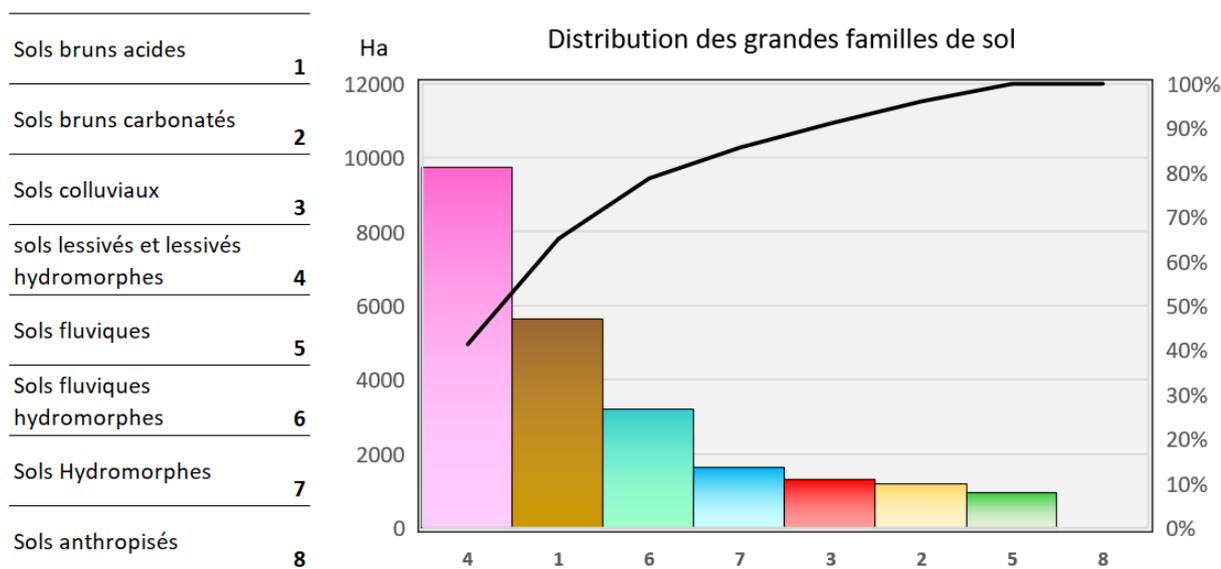


Fig. 79 : Distribution des grandes familles de sol

### Propriétés et caractéristiques édaphiques des UCS

Les investigations de terrain menées pendant 9 mois pour réaliser près d'un millier de sondages à la tarière à main et ouvrir 30 fosses pédologiques ont permis de franchir l'étape de la connaissance des sols concernant leur diversité et leur répartition spatiale. Pour la première fois, la carte des Unités Cartographiques de Sol apporte une vision précise et harmonisée de cette ressource naturelle sur l'ensemble du territoire métropolitain. Les bases de données qui accompagnent cette cartographie permettent d'aller plus loin dans la présentation des sols en mettant en avant leurs propriétés et caractéristiques physiques, hydriques et pédoclimatiques.

#### L'épaisseur des sols.

L'épaisseur des sols rend compte indirectement des conditions de la pédogenèse qui agissent sur la dynamique de développement des couvertures pédologiques. Des sols épais seront l'expression d'une pédogenèse rapide induite par des conditions favorables (formations géologiques sensibles à l'altération, milieux chauds et humides, forte activité biologique, phénomènes érosifs absents ou très limités). Des sols minces témoigneront d'une pédogenèse contrainte par les facteurs cités précédemment (roches très résistantes à l'altération, ambiance fraîche et desséchante, faible activité biologique, érosion active).

La connaissance de cette propriété est fondamentale en raison de son influence sur les propriétés hydriques et pédoclimatiques des sols (réservoir utile, déficit hydrique, surplus hydrologique). Les documents ci-dessous rendent compte de la distribution spatiale des sols par classes d'épaisseur (cf. Fig.80 et 81). **Les sols très épais, atteignant et dépassant 1 mètre, couvrent 60 % des surfaces en Zones A, N et AU alors que les sols les plus minces pour lesquels l'épaisseur est inférieure à 40 cm n'en représentent que 20%.**

Les sols les plus épais s'observent dans des contextes topographiques d'interfluve (parties dominantes de plateau) et de fond de vallée (vallée de la Seine et vallées secondaires), sur pentes nulles ou faibles et en contexte de limons de plateau et d'alluvions récentes.

Les sols minces relèvent également de situations topo-géologiques spécifiques : rupture de pente de rebord de plateau, pentes fortes, alluvions anciennes sablo-graveleuses. Les sols d'épaisseur moyenne correspondent aux versants de transition entre plateau et vallées principales, sur des sections à pentes modérées favorisant l'accumulation des colluvions.

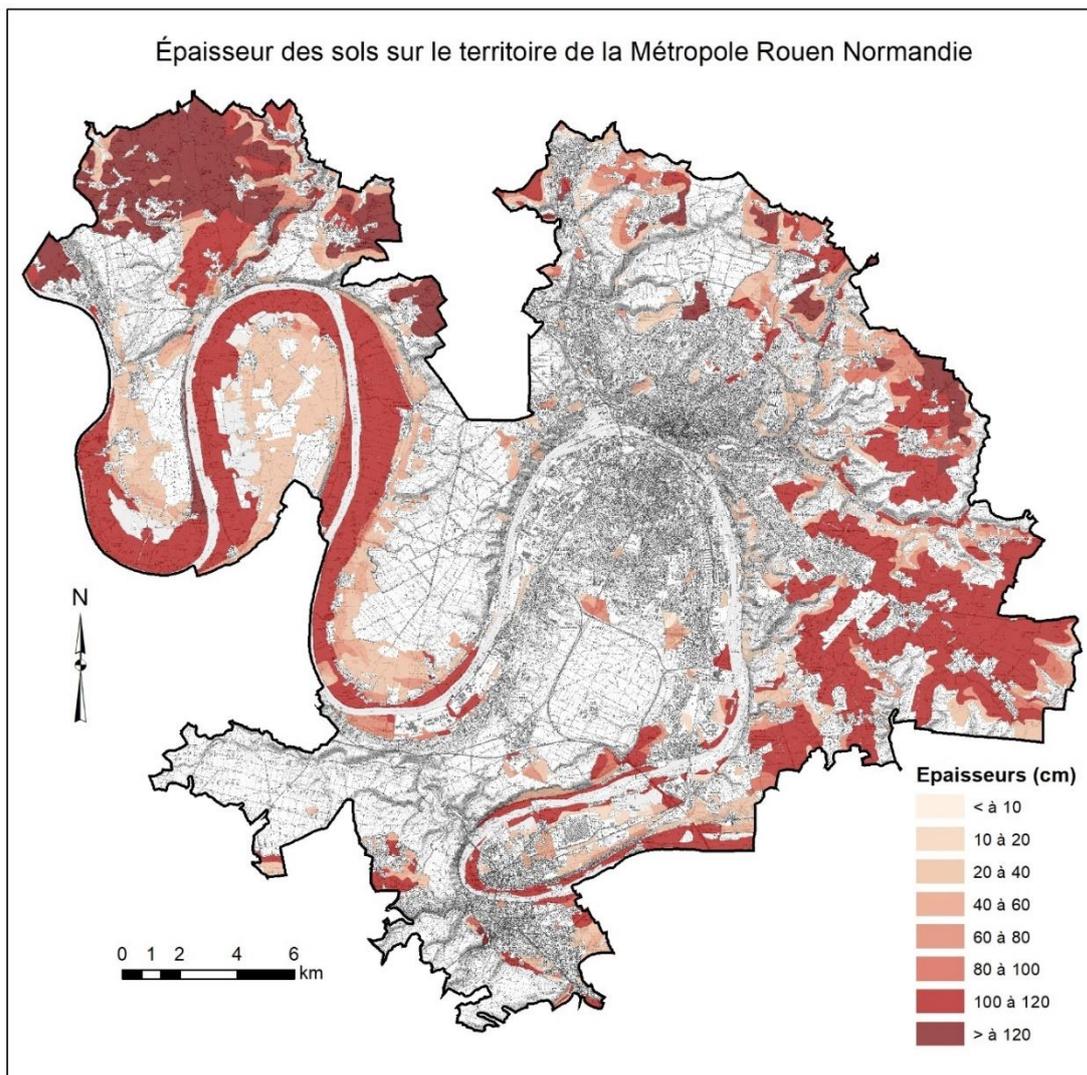


Fig. 80 : L'épaisseur des sols sur le territoire métropolitain

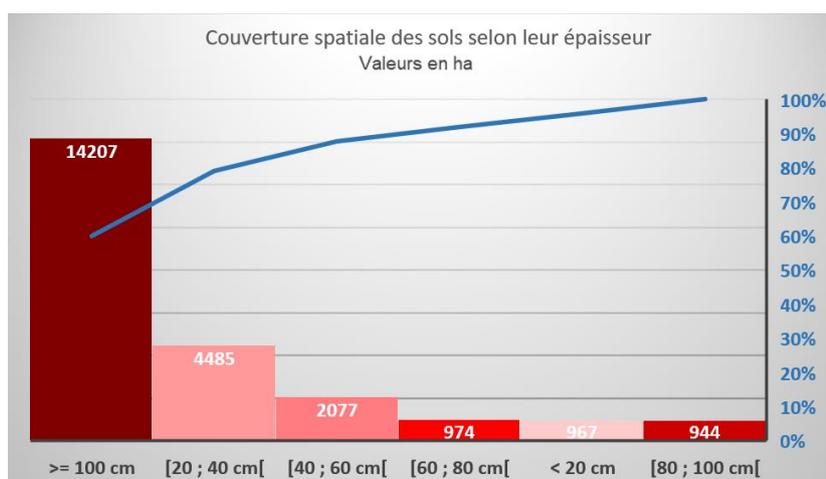


Fig. 81 : Couverture spatiale des sols selon leur épaisseur

### Les textures de surface et de profondeur.

La texture des horizons pédologiques sont corrélées avec la nature des matériaux géologiques aux détriments desquels les sols se sont formés et avec certaines formes de la pédogenèse (lessivage par exemple). La palette texturale qui en résulte s'étend des textures les plus fines (textures argileuses) aux textures les plus grossières (textures sableuses) en passant par des textures dites équilibrées dans lesquelles on retrouve en proportion équilibrée les argiles, limons et sables granulométriques (textures limono-argilo-sableuses). Tout comme pour l'épaisseur, **cette propriété est essentielle à déterminer car d'autres propriétés édaphiques lui sont liées comme l'aptitude à la fissuration, la stabilité structurale, la perméabilité, le Réservoir utile ou bien encore la capacité d'échanges cationiques.**

La différenciation texturale entre les horizons de surface et les horizons profonds est également un élément de caractérisation du comportement des sols et des processus qui s'y déroulent. **Le passage d'une texture équilibrée ou grossière à une texture fine argileuse peut réduire significativement la capacité du drainage du sol et ralentir fortement la dynamique d'infiltration des eaux. Dans les deux cas, il en résulte une situation d'engorgement en eau dans les sols qui vont créer des conditions d'anoxie défavorables aux processus biologiques et/ou l'apparition d'un ruissellement érosif en l'absence d'un couvert végétal protecteur.** Ce changement d'état textural peut se traduire également par une fertilité chimique contrastée qui peut perturber le développement racinaire et donc la croissance des végétaux. La différenciation texturale verticale dans un sol peut donc avoir un large éventail d'impacts sur ses propriétés physiques, chimiques et biologiques, ce qui à son tour peut influencer sa fertilité, sa stabilité et sa capacité à soutenir la croissance des plantes.

**La carte des textures de surface fait ressortir les deux grandes entités topographiques** (cf. Fig.82).

En contexte de plateau, les horizons de surface sont marqués par des textures limoneuses (LM, LMS) qui rappellent la signature granulométrique des formations superficielles à partir desquelles les sols se sont développés (limons de plateau). Ces deux textures couvrent une superficie d'environ 14 000 ha (cf. Fig.83).

En vallée de Seine, les textures sont beaucoup plus sableuses sur les anciennes terrasses alluviales (LS, SL, S) en raison de la nature des alluvions qui se sont déposées. Elles couvrent un peu plus de 3 600 ha. C'est pour cette même raison que les horizons de surface des sols issus des alluvions récentes (lit majeur du fleuve) se distinguent nettement des précédents. Les textures deviennent alors limono-argileuses et secondairement argileuses (4 100 ha environ). Dans les parties déprimées, un troisième cas de figure peut être relevé. Il s'agit des sols des vallées secondaires dont les textures de surface sont étroitement associées à une dynamique colluvio-alluviale des sédiments provenant des plateaux. Les horizons de surface se distinguent par une texture limoneuse ou limono-argileuse.

C'est sur les versants de transition entre plateau et vallées que les textures sont les plus hétérogènes. Elles sont la conséquence des colluvionnements quaternaires qui ont remobilisé et remanié tout ou partie des sédiments des rebords de plateau. Les textures peuvent être argilo-sableuses, limono-argilo-sableuses ou encore limono-sablo-argileuses.

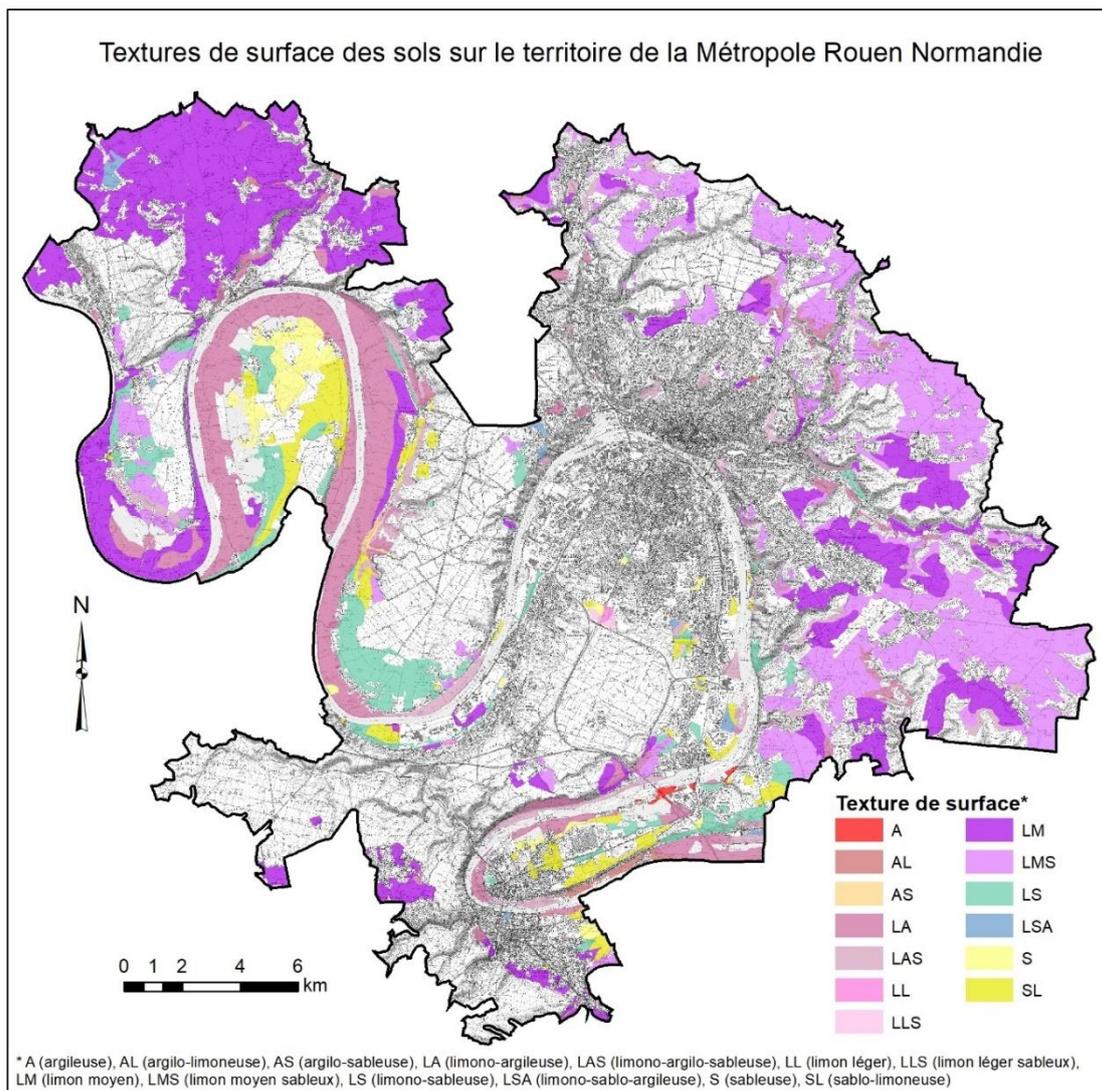


Fig. 82 : Carte des textures de surface

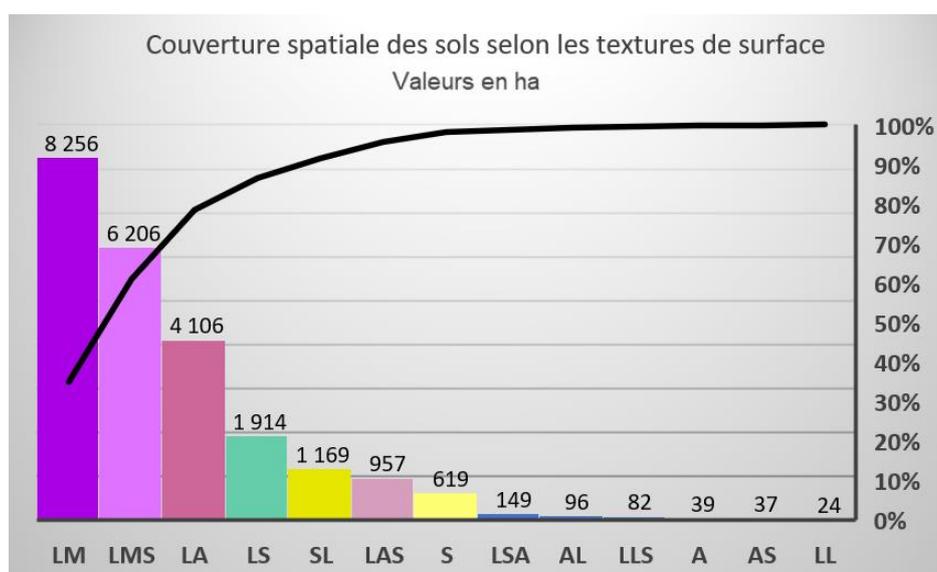


Fig. 83 : Couverture spatiale des sols selon les textures de surface

La carte des textures de profondeur montre que les différenciations texturales verticales sont la conséquence directe de la pédogenèse qui s’est installée en contexte de limons de plateau (cf. Fig.84). Le lessivage a appauvri la partie supérieure des sols en argiles et augmenté leur proportion dans les niveaux inférieurs. Il en résulte des textures de profondeur de types limono-argileuse à argilo-limoneuse qui couvrent près de 13 000 ha des espaces en zones A, N et AU (cf. Fig.85).

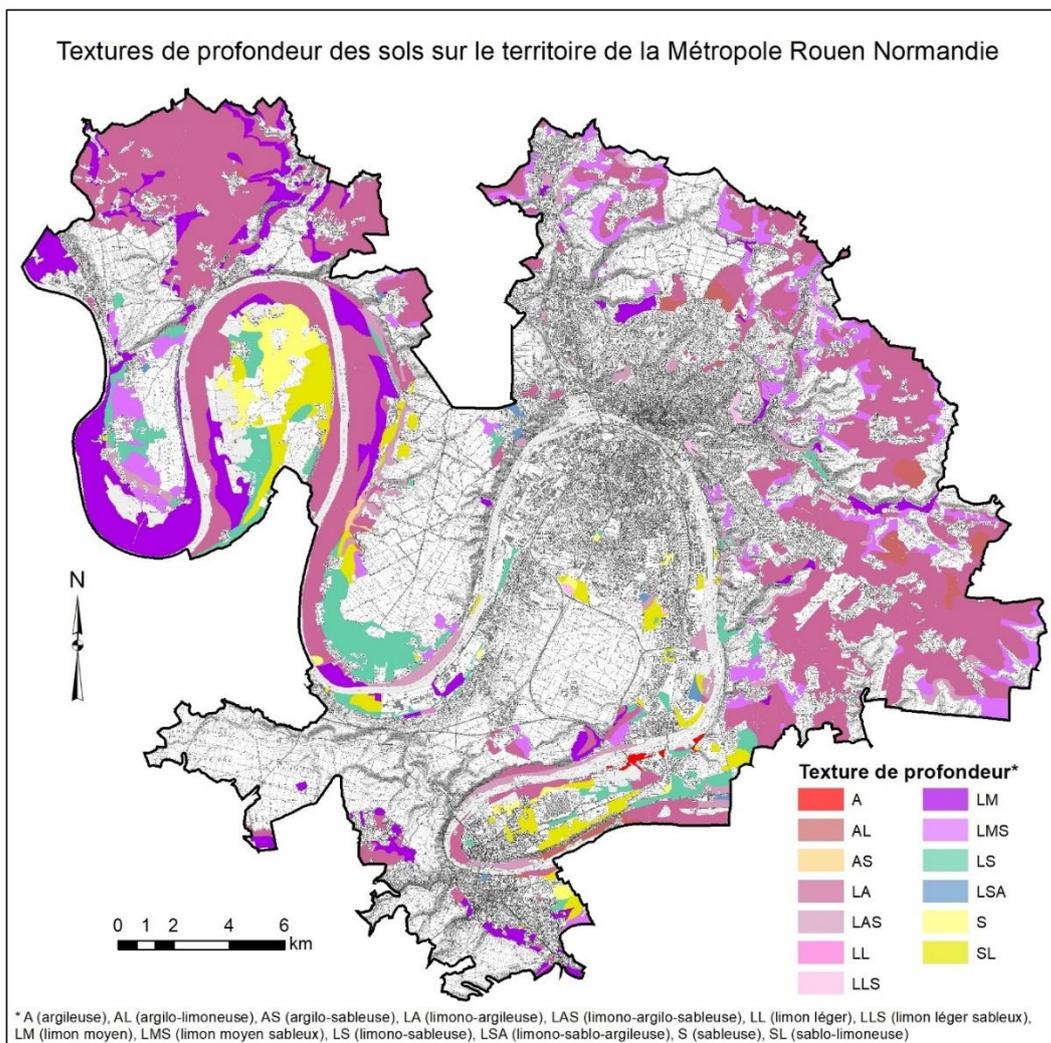


Fig. 84 : Carte des textures de profondeur

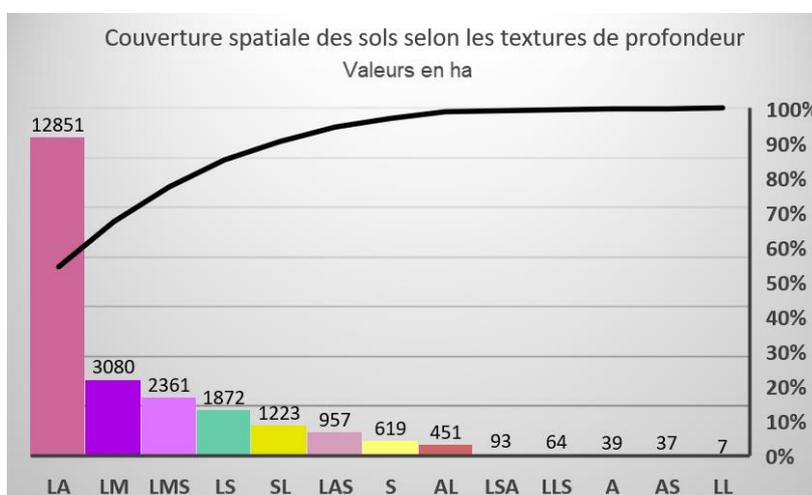


Fig. 85 : Couverture spatiale des sols selon les textures de profondeur

### Hydromorphie et prédispositions aux sols de Zone Humide.

L'hydromorphie est le résultat d'une situation d'engorgement en eau durable dans le sol. Elle traduit de manière visuelle le processus d'oxydo-réduction du fer et du manganèse. L'oxydation (concentration du fer ferrique et du manganèse) est associée respectivement à la présence de taches rouilles et noires, la décoloration (appauvrissement en fer ferrique) à des taches beiges/blanchâtres et la réduction (fer ferreux) à une coloration de la matrice du sol qui peut être grisâtre, bleuâtre ou verdâtre. La saturation en eau du sol entraîne une diminution de l'aération du sol, une diminution de la disponibilité en oxygène pour les racines des plantes, et favorise le développement de conditions anaérobies, où les micro-organismes décomposent la matière organique en l'absence d'oxygène. Les sols hydromorphes sont de très bons indicateurs de la présence de zones humides qui jouent un rôle crucial dans l'équilibre écologique, offrant des habitats uniques pour une variété de plantes et d'animaux, ainsi que des services écosystémiques importants tels que la filtration de l'eau, la régulation du climat et la protection contre les inondations.

La gestion durable des zones humides implique donc souvent des mesures de conservation, de restauration et de réglementation pour préserver ces écosystèmes fragiles. Selon l'arrêté du 24 juin 2008 modifié en 2009 précisant les critères de définition et de délimitation des Zone Humide en application des articles L. 214-7-1 et R. 211-108 du code de l'environnement, ces espaces naturels peuvent être reconnus sur des critères pédologiques définis par le GEPPA. Ces critères sont référencés dans le Guide pour l'identification et la délimitation des sols de Zones Humides (MEDDE, GIS Sol, 2013. Guide pour l'identification et la délimitation des sols de Zones Humides. Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, Groupement d'Intérêt Scientifique Sol, 63 pages.). Ils reposent sur des éléments de description de profil de sol que nous avons collectés lors de nos campagnes de sondage à la tarière. Il est donc possible d'établir une correspondance entre les Unités Cartographiques de Sol et les classes GEPPA spécifiques aux sols de Zone Humide.

Toutefois, compte tenu de la densité des relevés pédologiques jugée insuffisante pour délimiter avec la précision imposée ce type de sol, nous avons fait le choix de retranscrire et de cartographier ces éléments de description en niveaux de prédisposition aux sols de Zone Humide selon la classification suivante (cf. Fig.86) :

Classes GEPPA	Prédisposition sol de Zone Humide
0	Sols non hydromorphes
III	Pas de prédisposition
IV	Faible prédisposition
V et VIa, b et c	Forte prédisposition
VId	Très forte prédisposition

Fig. 86 : Classes GEPPA et prédisposition des sols de zone humide

La carte des prédispositions aux sols de Zone Humide apporte une vision synoptique des situations d'engorgement en eau durable dans les sols (cf. Fig.87). **Elle souligne le caractère très marginal des UCS à la prédisposition aux sols de Zone Humide puisque leur couverture spatiale est estimée à 490 ha, ce qui représente à peine 2% des surfaces en Zone A, N et AU (cf. Fig.88). Les sols à forte et très forte prédisposition sont localisés majoritairement en bordure de Seine et de manière ponctuelle dans les vallées secondaires.** A noter que les sols à faible prédisposition (classe IV du GEPPA) sont susceptibles de présenter localement des prédispositions plus élevées à la faveur de contextes topogéologiques entravant fortement le drainage des eaux pluviales. Les surfaces associées représentent tout de même 5 642 ha et concernent autant les sols de vallée que les sols de plateau.

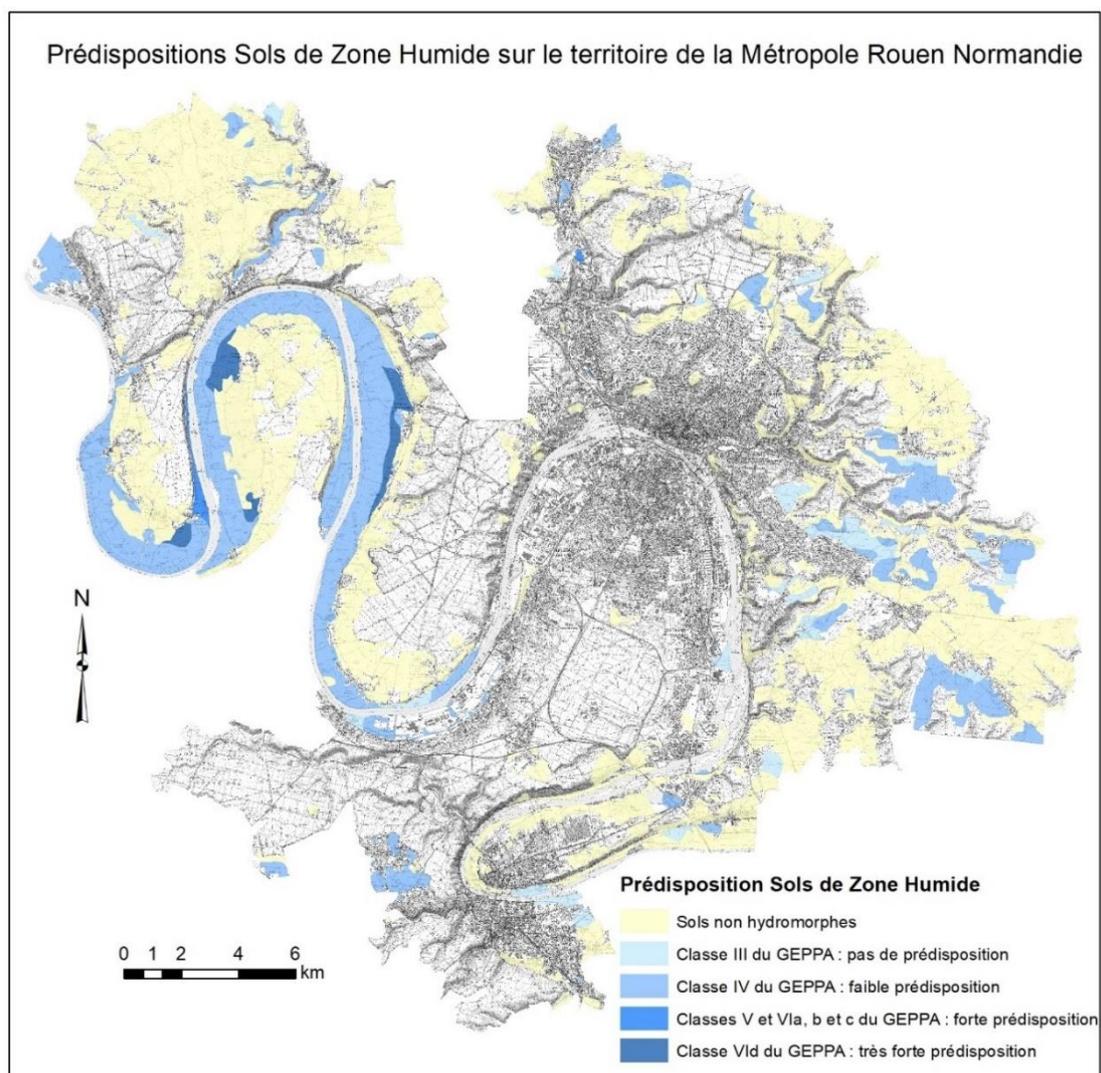


Fig. 87 : Prédisposition Sols de Zone Humide sur le territoire métropolitain

**Couverture spatiale des sols selon leur prédisposition Sols de Zone Humide (valeurs en ha)**

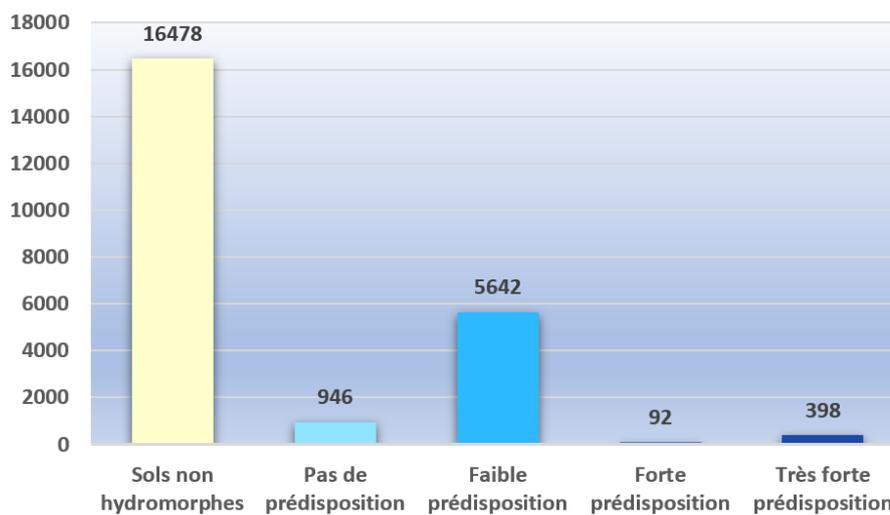


Fig. 88 : Couverture spatiale des sols selon leur prédisposition Sols de Zone Humide

### Le Réservoir Utile.

Le Réservoir Utile des sols définit la capacité de stockage en eau utile pour les végétaux. Son calcul mobilise les fonctions de pédotransfert qui permettent de déterminer une capacité de stockage en eau utile en fonction de la texture des horizons. Dans le cas des sols lessivés, on moyenne le RU de la texture de surface et celui de la texture de profondeur. La valeur est exprimée en mm d'eau par cm d'épaisseur de sol. Il suffit ensuite de multiplier l'épaisseur d'un sol par cette valeur pour obtenir le RU total. Celui-ci doit être finalement pondéré en tenant compte de la charge en éléments grossiers du sol. Ainsi, un sol doté d'une charge en éléments grossiers de 10% aura un RU final réduit de 10% par rapport au RU total initial.

La connaissance de cette propriété hydrique est inestimable à plus d'un titre. **Le RU permet d'évaluer la quantité d'eau maximale que le sol peut contenir pour approvisionner les plantes, maintenir leur turgescence et assurer leur croissance et leur développement.** C'est un indicateur incontournable pour déterminer le potentiel agronomique et écologique des sols. **Le RU porte également la fonction de régulation du cycle de l'eau parce qu'il exprime la capacité du sol à stocker l'eau des précipitations et à la libérer progressivement, ce qui réduit les risques d'inondations et d'érosion hydrique.** Par ailleurs, dans un contexte de réchauffement climatique, **un RU élevé permet d'atténuer les effets des sécheresses en fournissant possiblement une réserve d'eau pour les plantes pendant les périodes de stress hydrique.**

La carte et le graphique ci-dessous rendent compte des RU des sols sur le territoire de la MRN (cf. Fig.89 et 90). Ils font ressortir deux cas de figures diamétralement opposés. **En premier lieu, on note que les sols caractérisés par un RU élevé à très élevé (150 mm et plus) couvrent une superficie importante puisqu'ils représentent 60% des surfaces en zone A, N et AU (15 000 ha).** Ils sont localisés sur les parties intérieures du plateau, dans les vallées secondaires et en bordure de Seine. Cette situation tranche nettement avec les sols à RU faible et modeste (inférieur à 100 mm) qui occupent une superficie non négligeable de près de 8 000 ha, soit un tiers des zones A, N et AU. On les retrouve sur les rebords de plateau, sur les versants de transition à pente forte et sur les anciennes terrasses alluviales de la Seine.

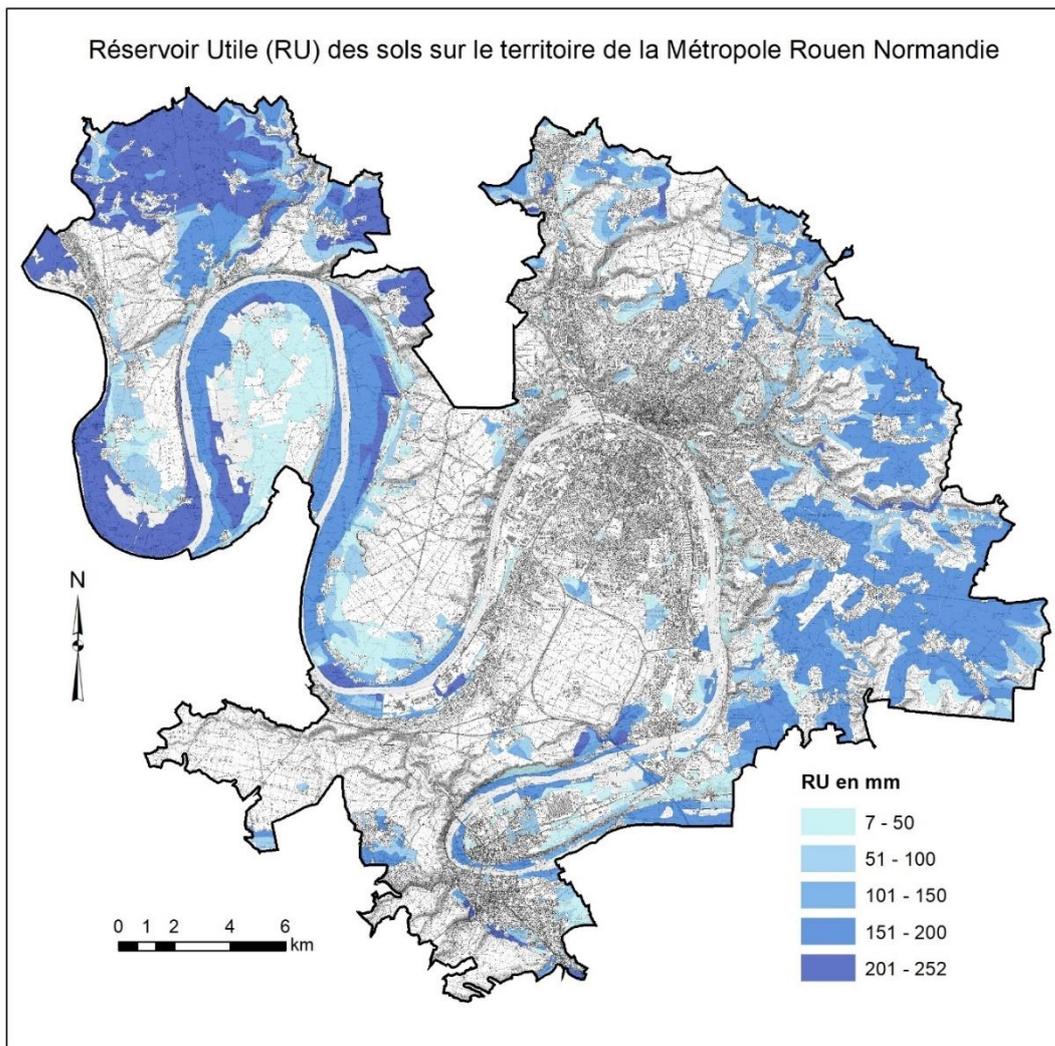


Fig. 89 : Carte des Réservoirs Utiles des sols sur le territoire de la Métropole

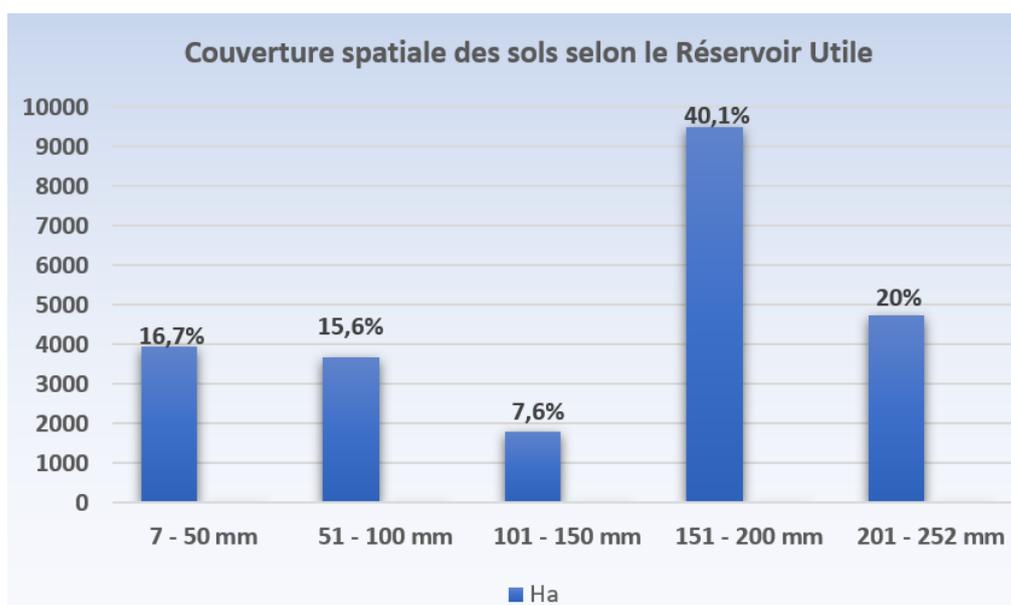


Fig. 90 : Couverture spatiale des sols selon le Réservoir Utile

### Le déficit hydrique.

Le déficit hydrique est une caractéristique pédo-climatique issue de la prise en compte du RU des sols et du climat local défini à partir de la Normale climatique de Météo France qui fait référence aux enregistrements des données météorologiques entre 1981 et 2010. Il est calculé à partir de la méthode du bilan hydrique. Afin de tenir compte de l'influence des deux grandes unités topographiques du territoire sur le climat local que sont le plateau et la vallée de la Seine, nous avons déterminé le déficit hydrique des sols à partir d'un bilan hydrique spécifique à chacune de ces deux unités en nous appuyant sur les données climatiques qui leur sont propres.

**Les conséquences d'un déficit hydrique important sont à la fois agronomiques, climatiques, hydrologiques et pédologiques.** Le manque d'eau dans le sol entrave la capacité des plantes à absorber l'eau nécessaire à leur croissance et à leur développement, ce qui peut entraîner un retard de croissance, une diminution de la production de biomasse et de rendement des cultures. Il peut augmenter le stress thermique pour les plantes car l'eau dans le sol joue un rôle dans la régulation de la température du sol et de l'air environnant. Le déficit hydrique des sols peut engendrer également une diminution du niveau des nappes phréatiques, des rivières et des lacs, ce qui peut affecter l'approvisionnement en eau pour les usages agricoles, industriels et domestiques, ainsi que la santé des écosystèmes aquatiques. Enfin, les sols soumis à un déficit hydrique intense peuvent devenir plus compacts, ce qui réduit leur porosité et leur capacité à absorber l'eau avec pour conséquence une augmentation possible de l'érosion du sol, une perte de fertilité et une diminution de la biodiversité du sol. L'évaluation de cette caractéristique pédo-climatique est donc primordiale dans une optique (1) de gestion durable de l'eau et de l'agriculture et (2) de renforcement de la résilience des écosystèmes face aux changements climatiques.

Dans le cadre du contexte climatique de référence (1981-2010), **les données obtenues sur le territoire de la MRN (cf. Fig.91) montrent que le manque d'eau dans les sols demeure actuellement contenu pour 70% des surfaces (déficit hydrique inférieur à 100 mm)**. Les sols de plateau et de basse vallée de la Seine témoignent d'un déficit hydrique très limité qui s'avère peu impactant pour les écosystèmes. Toutefois, ce constat ne doit pas masquer les situations assez fréquentes pour lesquelles le manque d'eau dans les sols peut générer des contraintes fortes sur les milieux. **Ainsi, 1 ha sur 5 est caractérisé par un déficit hydrique très important d'au moins 150 mm (cf. Fig.92). Il concerne les zones de rebord de plateau, les versants de transition à pente forte et les anciennes terrasses alluviales de la Seine. Ces territoires apparaissent comme les plus fragiles face au réchauffement climatique.**

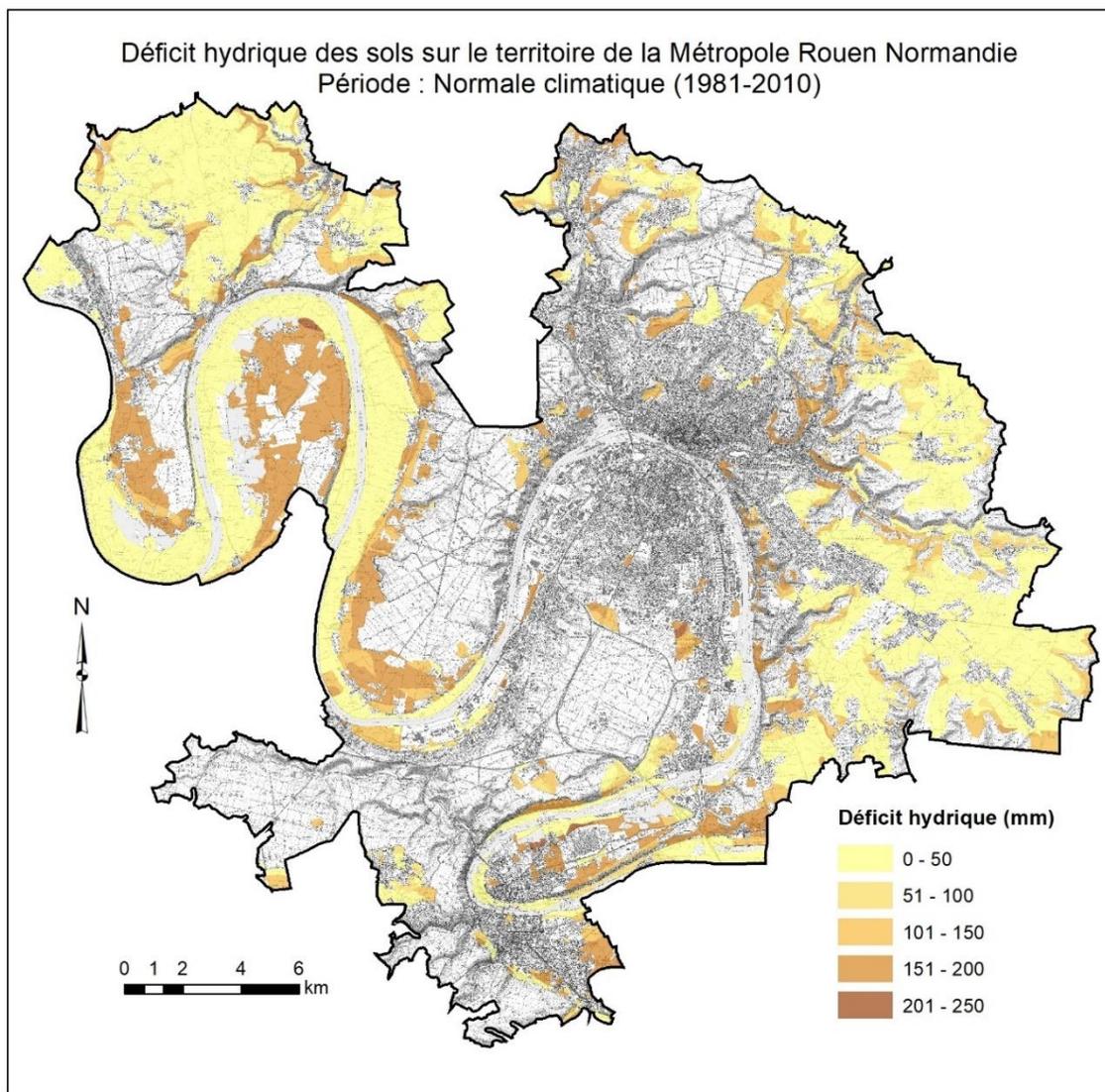


Fig. 91 : Carte des déficits hydriques des sols sur le territoire métropolitain

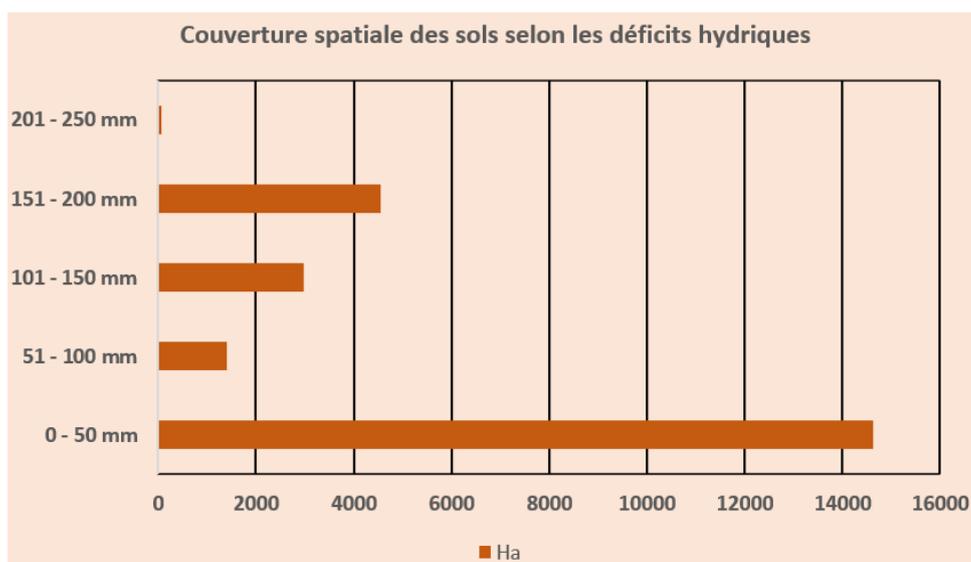


Fig. 92 : Couverture spatiale des sols selon les déficits hydriques

### Les surplus hydrologiques.

Tout comme pour le déficit hydrique, les surplus hydrologiques sont issus de la méthode du bilan hydrique qui croise le RU et les données climatiques pour la période 1981-2010. **Ils expriment les quantités d'eau pluviales qui ne sont pas retenues par les sols ou qui ne retournent pas directement vers l'atmosphère par évaporation. Ces surplus vont alimenter les masses d'eau superficielles et souterraines par ruissellement et par infiltration.** De ce fait, ils participent aux dynamiques qui animent le cycle de l'eau en soutenant les débits des cours d'eau et en rechargeant les nappes phréatiques.

Cependant, les surplus hydrologiques peuvent avoir plusieurs impacts préjudiciables sur les écosystèmes et les environnements naturels, impacts renforcés lorsque les surplus augmentent. Ils contribuent à la submersion des terres et des zones habitées lors d'épisodes d'inondation, entraînant des dégâts importants. Ils peuvent provoquer une érosion accrue des sols. Le ruissellement emporte alors les particules de sol, provoquant un appauvrissement des terres agricoles et une détérioration de la qualité physico-chimique des cours d'eau qui altère les écosystèmes aquatiques. Par ailleurs, les fluctuations extrêmes du niveau des eaux de surface liées aux surplus hydrologiques peuvent perturber parfois les habitats naturels et fragiliser la biodiversité. Les surplus hydrologiques peuvent contribuer à la propagation de polluants tels que les engrais agricoles, les pesticides et les déchets urbains et provoquer une pollution de l'eau et des dommages aux habitats naturels. Enfin, ces quantités d'eau peuvent avoir des répercussions économiques et sociétales en perturbant les activités agricoles, en endommageant les infrastructures et en entraînant des coûts de réparation et de reconstruction élevés.

Cette caractéristique pédo-climatique revêt alors un intérêt tout particulier dans la construction et l'application de mesures de gestion des bassins versants (construction de barrages et de digues, restauration des zones humides, mise en place de pratiques agricoles durables, gestion des eaux pluviales urbaine) pour réduire les effets néfastes des surplus hydrologiques sur les milieux naturels et les communautés humaines. La cartographie des surplus hydrologiques fait référence à une période de l'année qui s'étend d'octobre à mars et dont les valeurs obtenues sont issues d'une moyenne établie sur les 30 années de la normale climatique 1981-2010.

**La carte témoigne d'une grande diversité de situations** (cf. Fig.93). Les surplus disponibles pour le ruissellement et l'infiltration des eaux pluviales apparaissent faibles ou modestes sur les parties intérieures de plateau et en basse vallée de la Seine, ce qui concerne un peu plus de 13 000 ha. **Les surfaces les plus contributives à l'alimentation des eaux superficielles et souterraines** (cf. Fig.94) **représentent 32% des zones A, N et AU (environ 7 500 ha)**. Les surplus hydrologiques, supérieurs à 225 mm par an, correspondent aux territoires de rebord de plateau, de versant de transition à pente forte et des hautes et moyennes terrasses alluviales de la Seine.

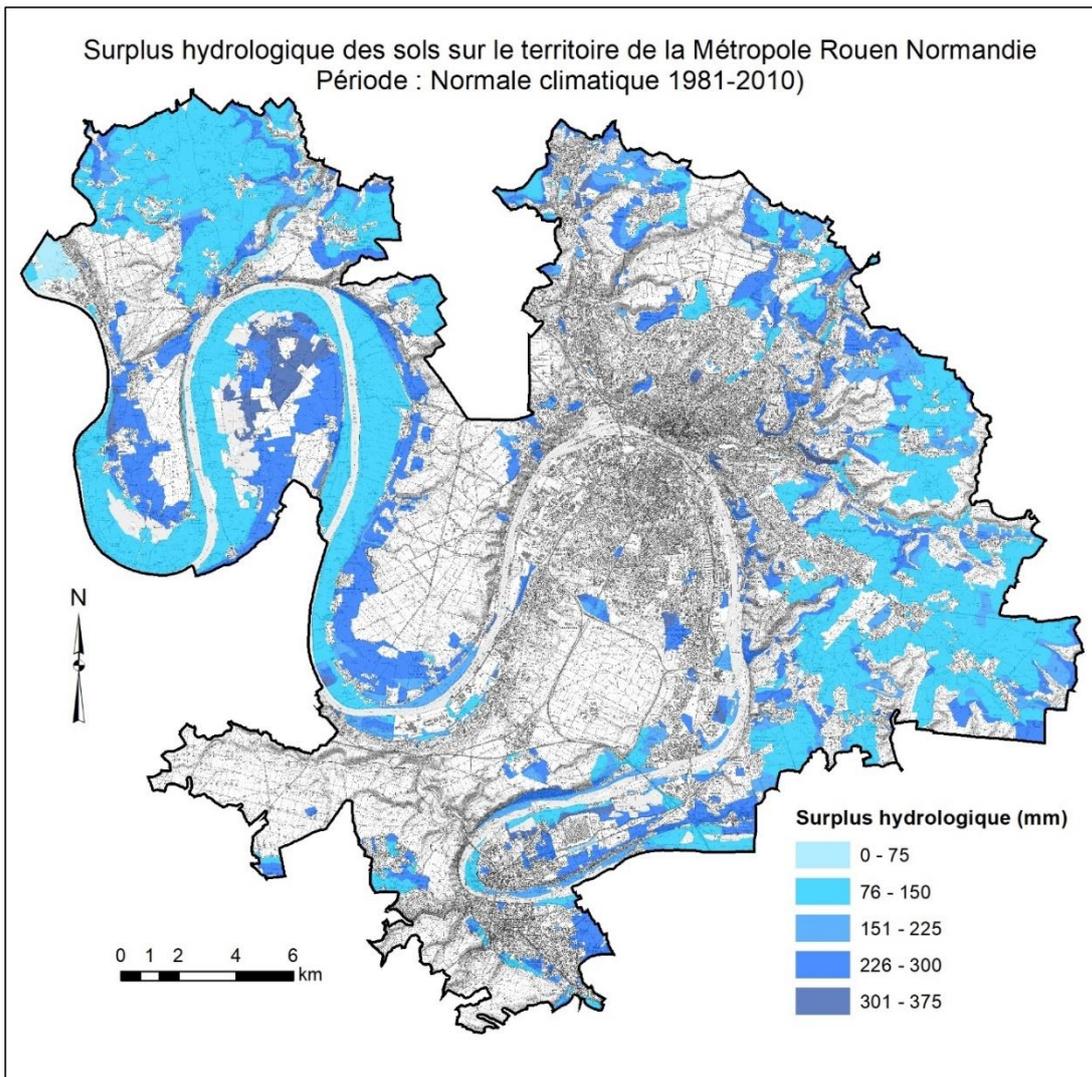


Fig. 93 : Carte des surplus hydrologiques des sols sur le territoire de la Métropole

Couverture spatiale des sols selon les surplus hydrologiques moyens obtenus pour la période octobre-mars et en référence à la normale climatique 1981-2010

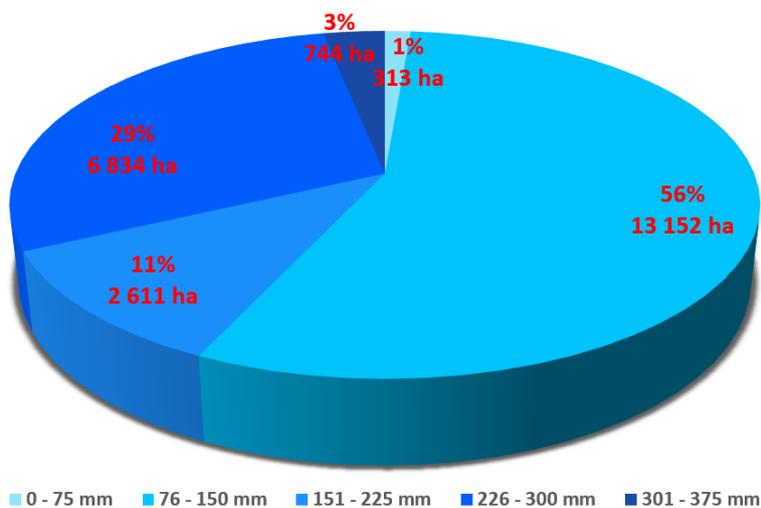


Fig. 94 : Couverture spatiale des sols selon les surplus hydrologiques

### 1.1.5. Exemples de données descriptives et analytiques saisies et stockées dans DONESOL

La production dans DONESOL d'une base sémantique sur les sols de la Métropole Rouen Normandie relève d'une démarche connexe à celle retenue dans le Cahier des Clauses Particulières. Nous avons décidé de saisir et de stocker sur cette plateforme numérique les données issues de la description de sondages tarière (profil) et des analyses des prélèvements effectués dans les fosses pédologiques (cf. fig. 95 et 96). Cette initiative personnelle a été motivée par le souci de s'assurer de conditions optimales de conservation de l'important travail de collecte des données Sol réalisé sur la métropole et par la volonté de lancer une procédure de contrôle qualité sur nos données.

DONESOLWEB 4 [Menu](#) [Aide](#) patrick.legouee@unicaen.fr

Profil / Afficher / N° 433536 Modifier Supprimer Exporter Droits

Propriétaire du profil : Le-Gouée Patrick patrick.legouee@unicaen.fr

**Géoréférencement**

Système de référence spatiale \* : 2154 - RGF93 / Lambert-93

Coordonnée x \* : 552888

Coordonnée y \* : 6932074

Département : 76 - SEINE-MARITIME

Commune :

Date d'observation : 12/05/2023

Éléments grossiers à la surface (%) :

Occupation du sol (codée) : 600 - Surface toujours en herbe (STH)

Domaine climatique : 7 - climat tempéré océanique

Fig. 95 : Exemple de données descriptives saisies et stockées dans DONESOL

Résultat analyse				
Détermination :	c_org_sol	Méthode :	0 - Non connue	Valeur : 2.13 Unité : %
Résultat analyse				
Détermination :	mat_org	Méthode :	28 - calculée Corg x 1.	Valeur : 3.66 Unité : %
Résultat analyse				
Détermination :	n_tot	Méthode :	31.1 - analyse élément	Valeur : 0.22 Unité : %
Résultat analyse				
Détermination :	c_n	Méthode :	0 - Non connue	Valeur : 9.9 Unité :
Résultat analyse				
Détermination :	s_t	Méthode :	0 - Non connue	Valeur : 74 Unité :
Résultat analyse				
Détermination :	ph_eau	Méthode :	6.1 - Détermination dl	Valeur : 5.7 Unité :

Fig. 96 : Exemple de données analytiques saisies et stockées dans DONESOL

Afin de garder une traçabilité entre le référencement local des sondages, des fosses et des prélèvements d'horizon et celui spécifique à DONESOL, nous avons construit un tableau de correspondance entre ces deux types de référencement (cf. fig. 97 et 98).

N° Sondages	N° DONESOL	N°Fosse	N° DONESOL
1	433647	378	435670
2	433646	380	435669
3	433645	385	435668
4	433643	389	435673
5	433642	471	435675
6	433641	173	435649
7	433640	171	435648
8	433639	466	435674
9	433638	192	435650

Fig. 97 : Tableau de correspondance entre référencement local et référencement DONESOL des données issues des sondages et des fosses pédologiques 1/2

N° Fosse	N° Prélèvement Fosse DONESOL				N° ANALYSE DONESOL			
	Horizon1	Horizon2	Horizon3	Horizon4	Horizon1	Horizon2	Horizon3	Horizon4
13	371446	371445	371447	ND	322418	322417	322419	ND
33	371448	371449	371450	ND	322420	322421	322422	ND
70	371451	371452	371453	ND	322423	322424	322425	ND
133	371454	ND	ND	ND	322426	ND	ND	ND
136	371455	371456	371457	ND	322427	322428	322429	ND
171	371458	371459	371460	ND	322430	322431	322432	ND

Fig. 98 : Tableau de correspondance entre référencement local et référencement DONESOL des données issues des sondages et des fosses pédologiques 2/2

## 1.2. La caractérisation des sols des 11 sites tests UP et URP

La reconnaissance des sites tests en milieu urbain a montré l'existence d'espaces végétalisés susceptibles d'être prospectés à la tarière à main pour caractériser les sols et leur niveau d'anthropisation. Pour chaque UP et URP, nous avons positionné 1 à 2 points de sondage dans les secteurs les plus représentatifs de chaque site. Au total, nous avons retenu 17 points de sondage (cf. fig.99).

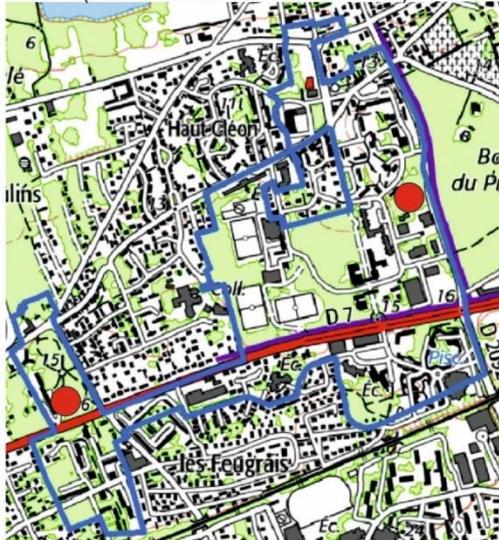
Il ressort de ces premières investigations quelques précieux enseignements :

- tous les sites ont pu être sondés sans difficulté particulière. Les blocages rencontrés relèvent de causes habituellement identifiées en milieu agricole, naturel ou forestier (charge caillouteuse importante, substrat en place peu altéré).
- à l'exception de l'URP 12 (Caudebec-les-Elbeuf), tous les autres sites attestent la présence de sols en tous points comparables à ceux que l'on retrouve dans les territoires ruraux (cf. fig.100). Une petite nuance doit être apportée pour l'UP d'Elbeuf dont le sol est partiellement anthropisé dans sa partie supérieure.

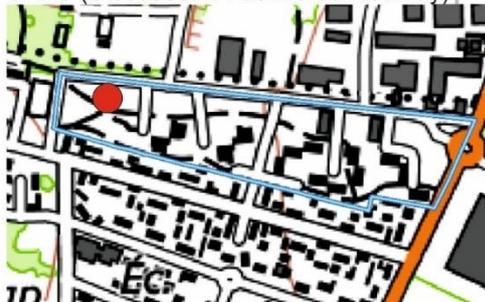
- à contexte topo-géologique analogue, la comparaison des profils de sol urbains avec ceux des espaces agricoles et naturels ne révèle aucune différence. Par conséquent, ces espaces végétalisés urbains reposent sur des sols préservés des opérations d'aménagement situées en périphérie.

- la pédogenèse et les types de sol associés qui ont été rencontrés dans ces UP et URP corroborent les logiques de distribution spatiale que nous avons établies pour les territoires en zones A, N et AU. De ce fait, nous avons décidé d'aller au-delà des attendus du Cahier des Clauses Particulières en engageant la production d'une base de données Sol spatialisée des 11 sites UP et URP. L'objectif étant alors de remobiliser ces connaissances pour évaluer la multifonctionnalité des sols en milieu urbain selon la même méthode que celle déployée en zones A, N et AU (MUSE). Nous présenterons les résultats ci-après.

URP3 (Cléon/Saint-Aubin-les-Elbeuf)



URP9 (Oissel/Saint-Etienne-du-Rouvray)



● Localisation des sondages tarière

URP12 (Caudebec-les-Elbeuf)



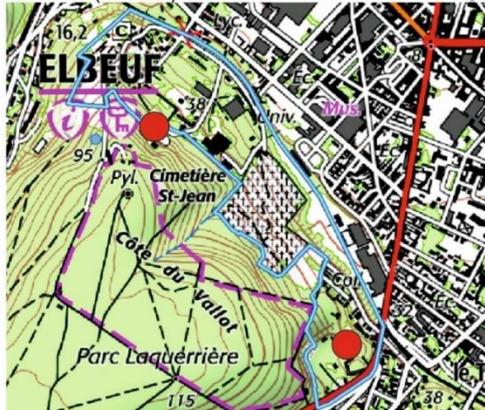
URP5 (La Bouille)



URP6 (La Londe)



URP14 (Elbeuf)



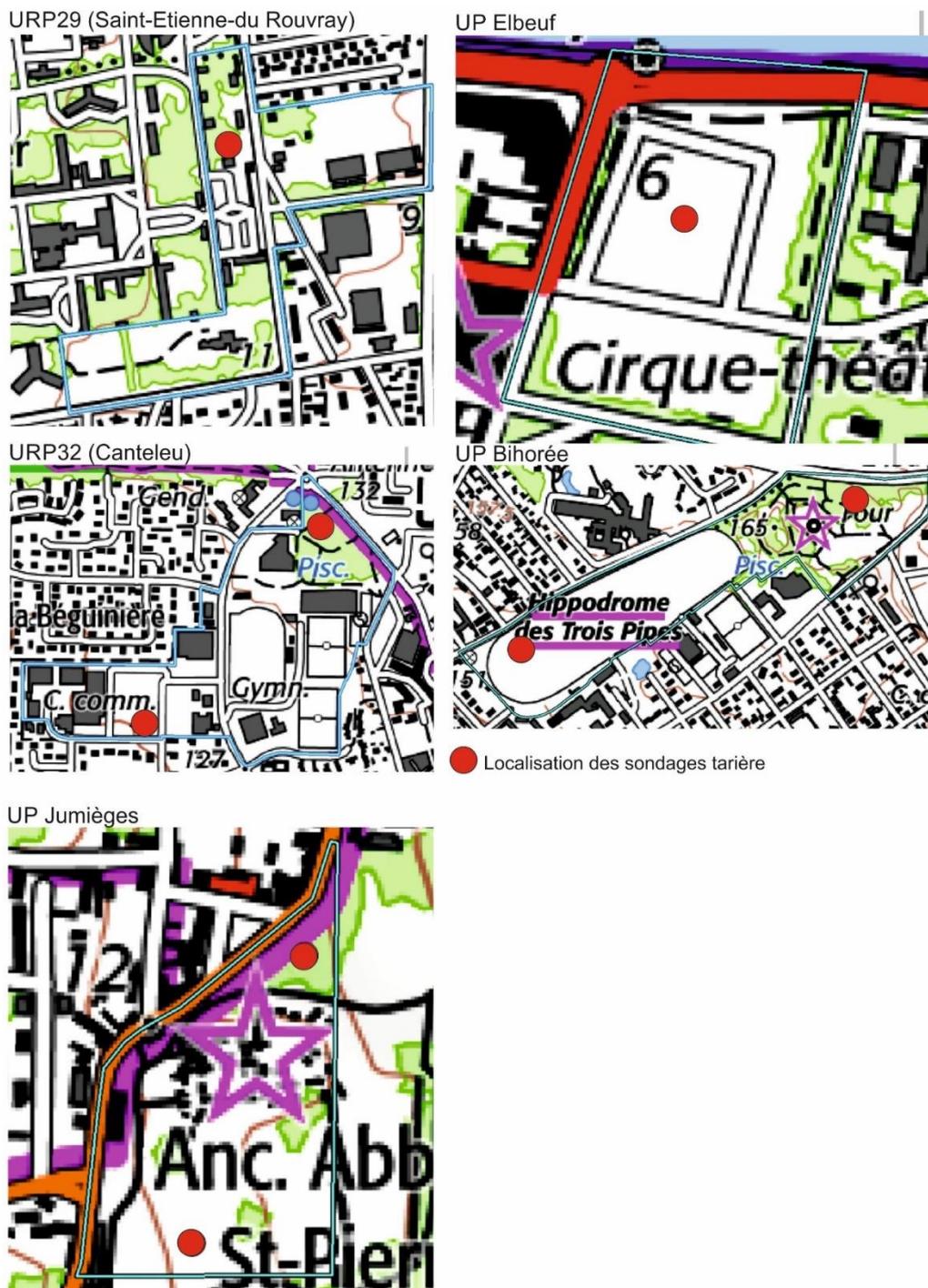


Fig. 99 : Localisation des 17 points de sondage dans les 11 sites tests UP et URP

## URP3 (Cléon/Saint-Aubin-les-Elbeuf)



*BRUNISOL leptique sablo-limoneux sur alluvions anciennes quaternaires*

## URP6 (La Londe)



*BRUNISOL leptique limoneux sur argiles à silex cénozoïques*



*BRUNISOL leptique sablo-limoneux sur alluvions anciennes quaternaires*



*REDOXISOL leptique limoneux sur argiles à silex cénozoïques*

## URP5 (La Bouille)



*CALCOSOL leptique sablo-limoneux sur craie crétacée*

## URP9 (Oissel/Saint-Etienne-du-Rouvray)



*RANKOSOL à substrat meuble sablo-limoneux sur alluvions anciennes quaternaires*

URP12 (Caudebec-les-Elbeuf)



*ANTHROPOSOL artificiel limoneux sur alluvions anciennes quaternaires*

URP29 (Saint-Etienne-du Rouvray)



*BRUNISOL sablo-limoneux sur alluvions anciennes quaternaires*

URP14 (Elbeuf)



*COLLUVIOSOL pachique limono-argileux sur colluvions quaternaires*

URP32 (Canteleu)



*BRUNISOL limono-argileux sur argiles à silex cénozoïques*



*COLLUVIOSOL carbonaté pachique limoneux sur colluvions quaternaires*



*BRUNISOL leptique limono-argileux sur argiles à silex cénozoïques*

## UP Jumièges



*COLLUVIOSOL carbonaté leptique sablo-limoneux sur colluvions quaternaires*



*COLLUVIOSOL carbonaté leptique sablo-limoneux sur colluvions quaternaires*

## UP Bihorée



*NEOLUVISOL-REDOXISOL limoneux sur limons de plateau quaternaires*



*BRUNISOL leptique argilo-limoneux sur argiles à silex cénozoïques*

## UP Elbeuf



*CALCOSOL anthropisé sablo-limoneux puis limono-argileux sur alluvions récentes holocènes*

Fig. 100 : Profil et types de sols rencontrés dans les 11 sites tests UP et URP

## 2. Les potentialités agronomiques des sols

### 2.1. Les potentialités agronomiques des sols en système conventionnel

Les potentialités agronomiques en système conventionnel sont très contrastées sur le territoire métropolitain. Les meilleures terres agricoles (notes 5 et 6 sur la carte ci-dessous) sont localisées principalement sur les parties intérieures de plateau (cf. Fig.101). Elles forment de grandes unités spatiales autour de trois pôles communaux :

- un 1<sup>er</sup> pôle au nord composé des communes d'Épinay-sur-Duclair, Sainte-Marguerite-sur-Duclair, Saint-Paër, Saint-Pierre-de-Varengueville et Duclair
- un deuxième pôle à l'est réunissant Saint-Martin-sur-le-Vivier, Roncherolles-sur-le-Vivier et Saint-Jacques-sur-Darnetal
- un dernier pôle au sud-est qui regroupe les communes de La Neuville-Chant-d'Oisel, Boos, Quevreville-la-Poterie, Ymare et Saint-Aubin-Celloville.

Ces potentialités élevées tranchent nettement avec la qualité agronomique des sols que l'on retrouve sur les anciennes terrasses alluviales de la Seine, en bordure du fleuve et plus encore sur les versants de transition à pente forte où les potentialités sont les plus faibles sur la MRN.

La comparaison des potentialités entre les zones A, N et AU (cf. fig.102) montre que les meilleures terres (notes 5 et 6) sont affectées à un usage agricole. Elles représentent près de la moitié des surfaces agricoles (7 025 ha/ 16 304 ha) et 90% des meilleures terres toutes surfaces A, N et AU confondues (7 025 ha/ 7 841 ha). **Pour les Zones N et AU, les sols à faible potentiel agronomique sont majoritaires (notes 1, 2 et 3). Ils couvrent plus de 54% des surfaces naturelles et à urbaniser.** Ils sont localisés plus spécifiquement sur les versants de transition à pente forte en zone N et sur les rebords de plateau ou les bas de versants des anciennes terrasses alluviales en zone AU.

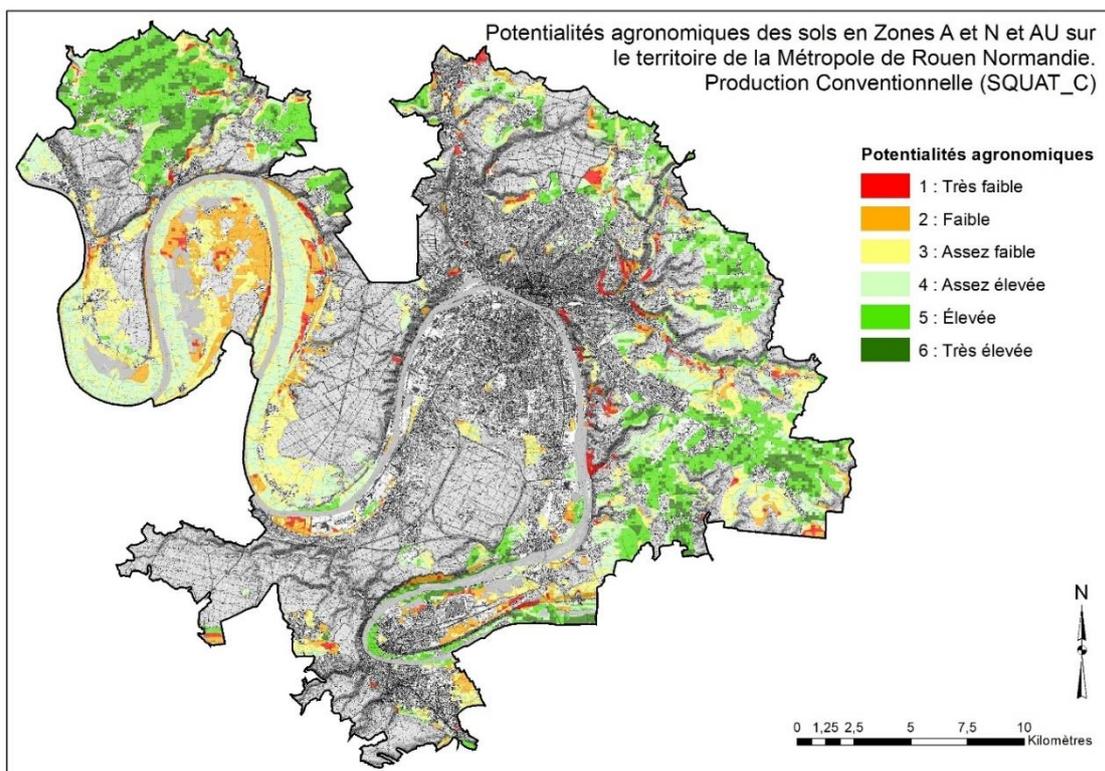


Fig. 101 : Carte des potentialités agronomiques des sols en système conventionnel pour les zones A, N et AU

Valeurs	Qualificatifs	Zones A		Zones N		Zones AU	
		SQUAT_C		SQUAT_C		SQUAT_C	
		Ha	%	Ha	%	Ha	%
1	Très faible	354	2,2	541	8,4	24	3,6
2	Faible	1 268	7,8	1 373	21,3	120	17,9
3	Assez faible	3 744	23,0	1 575	24,4	238	34,3
4	Assez élevée	3 913	24,0	2 259	35,0	190	26,9
5	Élevée	5 119	31,4	413	6,4	115	16,9
6	Très élevée	1 906	11,7	286	4,4	2	0,4
		16 304	100,0	6 445	100,0	689	100,0

Fig. 102 : Approche par zone des potentialités agronomiques des sols en système conventionnel

## 2.2. Les potentialités agronomiques des sols en système maraîcher

En situation de productions maraîchères (cf. Fig.103), les terres agricoles à potentiel agronomique élevé et très élevé couvrent une surface plus importante qu'en système conventionnel puisqu'elles représentent près de 8 000 ha, soit 1 000 ha de plus (cf. Fig.104). Ce gain s'explique par un relèvement des potentialités concernant les sols issus des anciennes terrasses alluviales de la Seine. On note également un gain surfacique substantiel des meilleures potentialités agronomiques pour les sols en zone AU dont la surface double par rapport à celles estimées en système conventionnel. A contrario, le système maraîcher est particulièrement défavorable en zone naturelle puisque les potentialités agronomiques les plus faibles (1, 2 et 3) couvrent près des ¾ des surfaces en zone N alors qu'elles n'en représentent que la moitié en système conventionnel.

Globalement, les meilleures terres pour le maraîchage (notes 5 et 6 de la carte ci-dessous) confortent les pôles à fort potentiel agronomique présentés pour le modèle conventionnel. On les retrouve aussi sur les bas de versant de la vallée de la Seine. Ce sont surtout les sols de bord de Seine sur alluvions récentes qui enregistrent un déclassement du potentiel comparativement à celui estimé en système conventionnel.

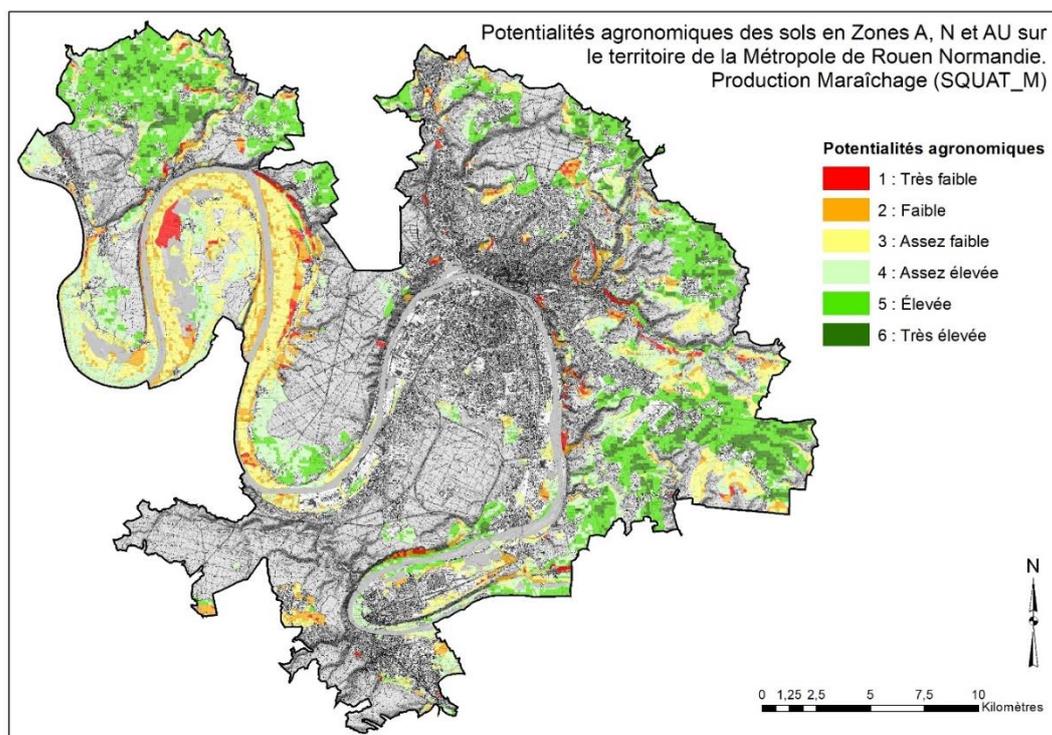


Fig. 103 : Carte des potentialités agronomiques des sols en système Maraîchagel pour les zones A, N et AU

Valeurs	Qualificatifs	Zones A		Zones N		Zones AU	
		SQUAT_M		SQUAT_M		SQUAT_M	
		Ha	%	Ha	%	Ha	%
1	Très faible	257	1,6	509	7,9	12	1,8
2	Faible	1 040	6,4	1 277	19,8	57	8,6
3	Assez faible	2 784	17,1	2 937	45,6	166	24,1
4	Assez élevée	4 299	26,4	1 215	18,9	262	37,2
5	Élevée	6 113	37,5	464	7,2	157	23,1
6	Très élevée	1 810	11,1	44	0,7	34	5,1
		16 304	100,0	6 445	100,0	689	100,0

Fig. 104 : Approche par zone des potentialités agronomiques des sols en système Maraîchage

### 2.3. Les potentialités agronomiques des sols en système élevage

L'estimation des potentialités agronomiques des sols en système d'élevage révèle une carte très différente des deux précédentes (cf. Fig.105).

Si les meilleures terres agricoles en systèmes conventionnel et maraîcher concernent les mêmes secteurs en système d'élevage, elles occupent un territoire plus restreint (cf. Fig.106) d'environ 5 000 ha (8 000 ha en système maraîcher). Dans une moindre mesure, il en est de même pour les sols en zone AU dont les potentialités agronomiques pour l'élevage demeurent limitées. Il en est tout autrement pour les sols des surfaces naturelles pour lesquelles cette orientation de production semble véritablement appropriée. En effet, 42% du territoire en zone N est caractérisé par un potentiel agronomique élevé ou très élevé, soit une superficie totale légèrement supérieure à 2 750 ha. Les meilleures terres d'élevage se répartissent de manière disséminée sur les parties de plateau et fortement concentrés en basse vallée de la Seine.

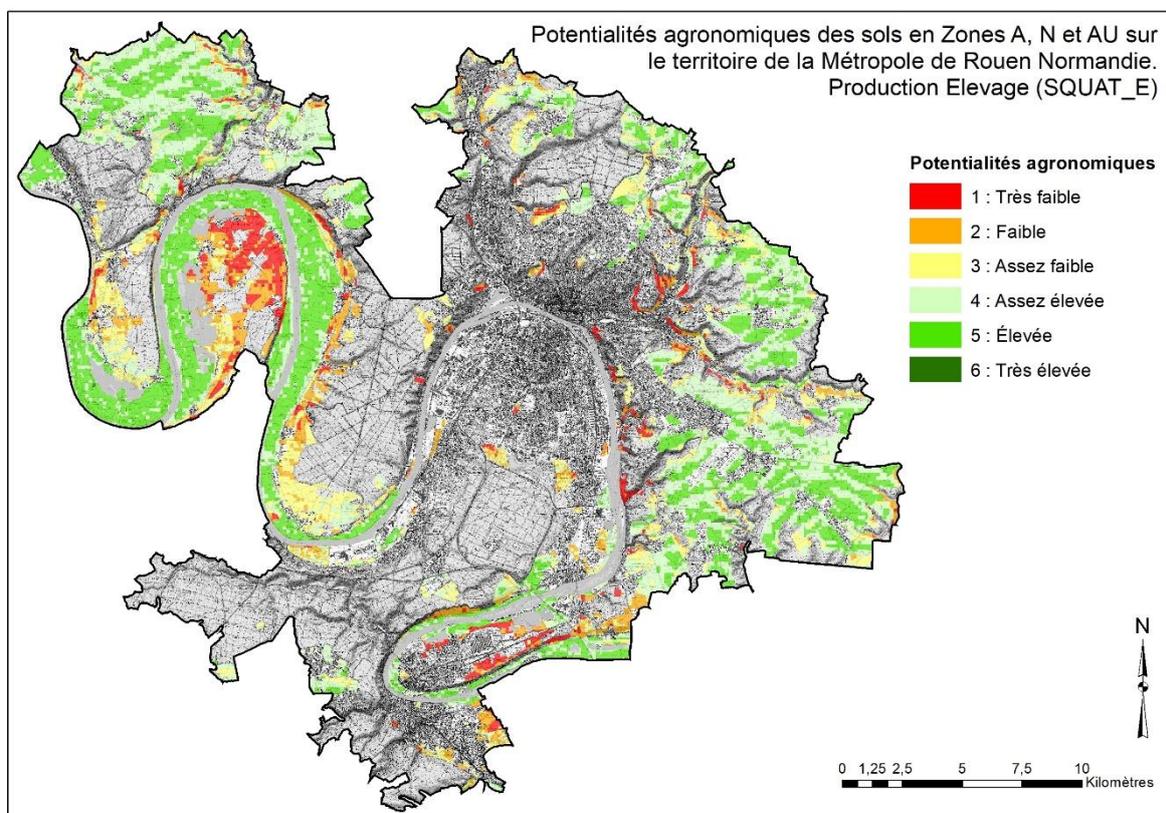


Fig. 105 : Carte des potentialités agronomiques des sols en système Élevage pour les zones A, N et AU

Valeurs	Qualificatifs	Zones A		Zones N		Zones AU	
		SQUAT_E		SQUAT_E		SQUAT_E	
		Ha	%	Ha	%	Ha	%
1	Très faible	606	3,7	741	11,5	64	9,6
2	Faible	1 190	7,3	978	15,2	134	19,7
3	Assez faible	2 696	16,5	676	10,5	216	30,9
4	Assez élevée	6 733	41,3	1 296	20,1	165	24,2
5	Élevée	5 061	31,0	2 742	42,5	110	15,6
6	Très élevée	18	0,1	14	0,2	0	0,0
		16 304	100,0	6 445	100,0	689	100,0

Fig. 106 : Approche par zone des potentialités agronomiques des sols en système Élevage

## 3. L'aléa Érosion des sols

### 3.1. La sensibilité potentielle des milieux à l'érosion hydrique

La sensibilité potentielle des milieux à l'érosion hydrique traduit l'influence des pratiques agricoles, du relief et des couvertures pédologiques dans la mise en place du processus d'érosion des sols. Pour comprendre les résultats obtenus à partir du modèle SCALES, il est essentiel de présenter les niveaux de pression érosive propres à chacun de ces trois facteurs.

#### 3.1.1. Pression érosive induite par les couverts agricoles

La protection des sols agricoles face à l'érosivité pluviale dépend du niveau de protection des couverts végétaux. L'allongement de la durée et la répétition de périodes non protectrices favorisent l'émergence de situations préjudiciable à la conservation des sols.

Les résultats obtenus montrent que les types de couverture végétale agricole ne constituent pas globalement un facteur d'aggravation de la sensibilité potentielle des milieux à l'érosion hydrique (cf. Fig.107). Les couverts végétaux pérennes (prairies) qui protègent totalement les sols occupent 1/3 des surfaces agricoles (zone A). La contribution possible des cultures sur la mise en place de l'érosion hydrique ne concerne qu'un peu plus de 10% du territoire en zone A, ce qui représente néanmoins une surface totale estimée à 2 000 ha (cf. Fig.108). Elles sont localisées de manière diffuse sur les parties de plateau et forment un ensemble plus cohérent sur l'un des bas de versant de la Seine, entre Hautot-sur-Seine et Saint-Pierre-de-Manneville.

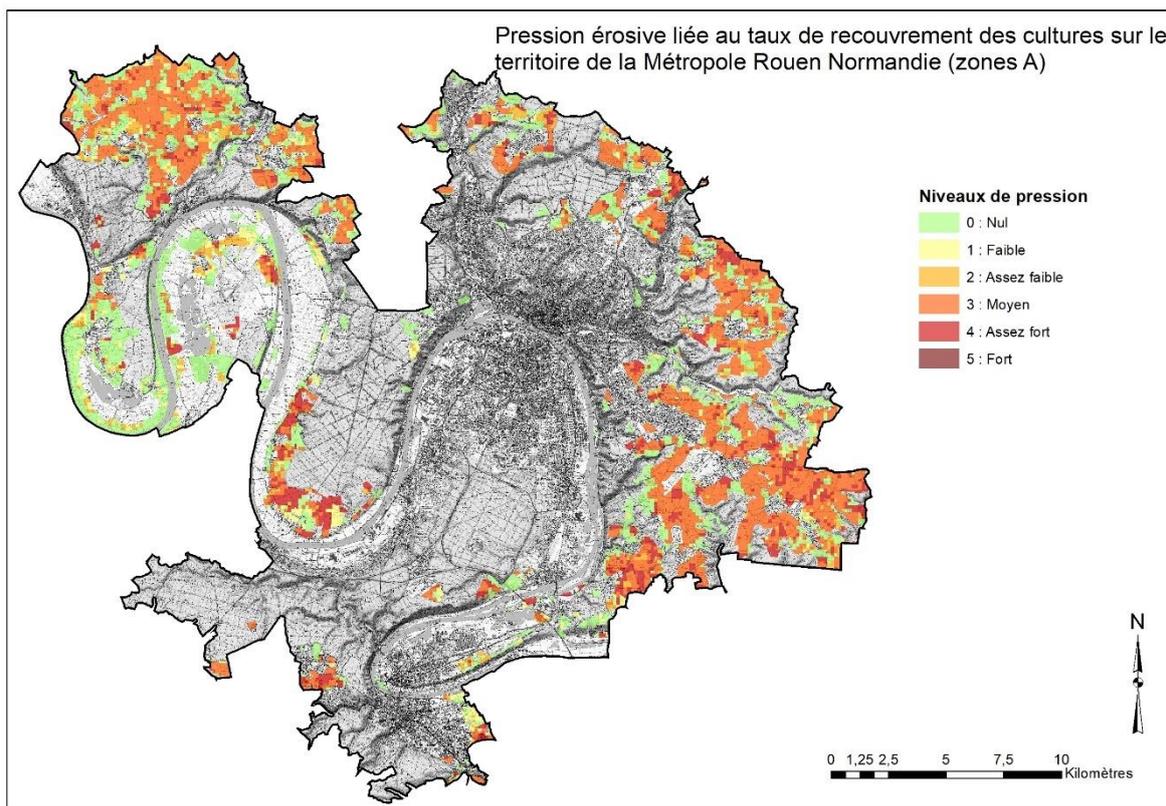


Fig. 107 : Carte de la pression érosive liée au taux de recouvrement des cultures (zone A)

Valeurs	Qualificatifs	Pression_Cultures	
		Ha	%
0	Nul	5 521,0	33,5
1	Faible	974,0	5,9
2	Assez faible	1 186,0	7,2
3	Moyen	6 743,0	41,0
4	Assez fort	2 033,0	12,4
5	Fort	0,0	0,0
		16 457,0	100,0

Fig. 108 : Surfaces associées aux niveaux de pression érosive liée au taux de recouvrement des cultures (zone A)

### 3.1.2. Pression érosive induite par le relief

Nous avons longuement décrit les caractéristiques orographiques lors de la présentation des sols. L'opposition entre le domaine de plateau et la vallée de la Seine, dont le seul point commun exprime la planéité des surfaces, est assurée par des versants de transition dont la déclivité peut être importante. On retrouve ce cas de figure pour les ruptures de pente de rebord de plateau, pour les versants des vallées secondaires très encaissées et pour les versants de la vallée de la Seine tournés vers le sud et l'ouest.

La carte de la pression érosive liée à la pente des versants souligne ces caractéristiques orographiques (cf. Fig.109). Si les pentes pas ou peu érosives couvrent 80% des surfaces en Zone A, il ne faut pas minimiser pour autant les contextes topographiques très favorables au déclenchement de l'érosion hydrique (niveaux de pression 4 et 5) puisqu'ils représentent une superficie totale de l'ordre de 1 100 ha (cf. Fig.110).

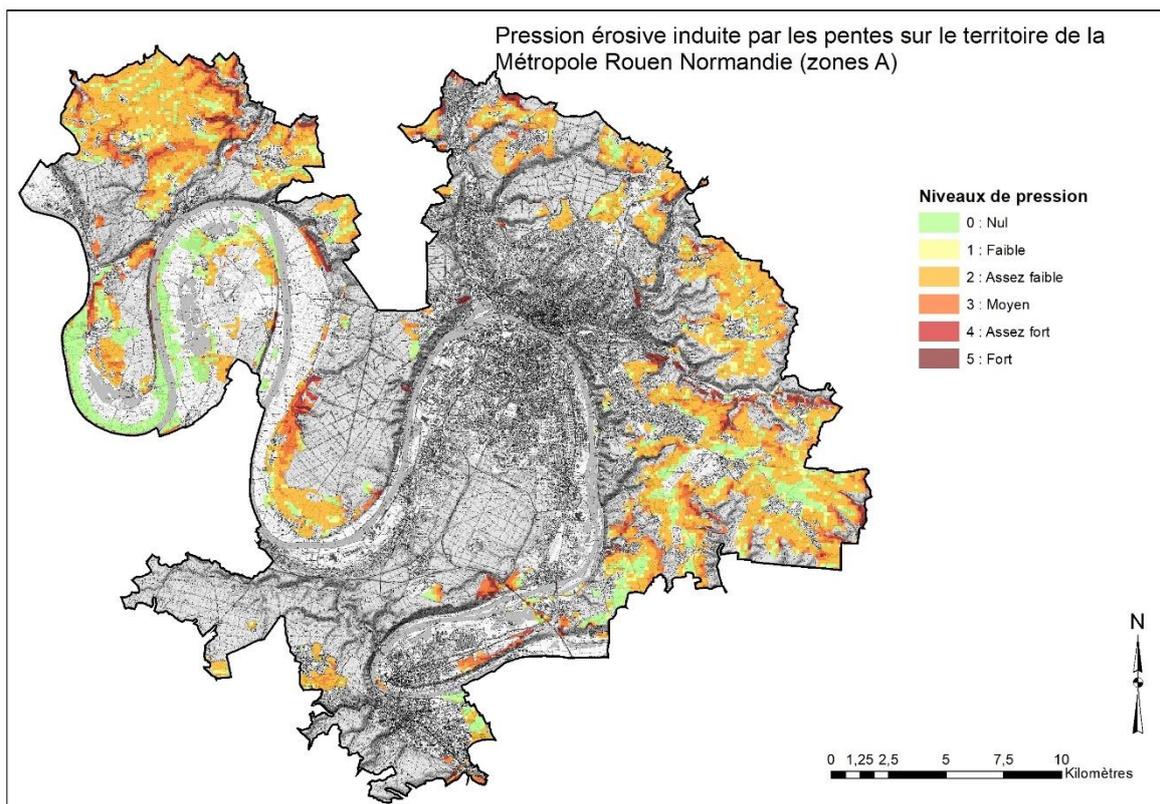


Fig. 109 : Carte de la pression érosive liée aux pentes (zone A)

Valeurs	Qualificatifs	Pression_Pentes	
		Ha	%
0	Nul	3 174,0	19,3
1	Faible	1 264,0	7,7
2	Assez faible	8 668,0	52,7
3	Moyen	2 207,0	13,4
4	Assez fort	477,0	2,9
5	Fort	667,0	4,1
		16 457,0	100,0

Fig. 110 : Surfaces associées aux niveaux de pression érosive liée aux pentes (zone A)

### 3.1.3. Pression érosive induite par la battance

L'instabilité structurale avérée de la partie supérieure des sols est incontestablement le principal facteur responsable de la sensibilité potentielle des milieux à l'érosion hydrique. La **battance des horizons de surface** (cf. Fig.111) révèle une pression érosive forte sur 85% des surfaces agricoles, ce qui représente une couverture territoriale de 14 000 ha (cf. Fig.112). La composition granulométrique des sols se traduit par des textures limoneuses à limono-sableuses dominantes qui fragilisent la structure des sols face à l'érosivité pluviale. Ces résultats montrent toute l'importance d'adapter les pratiques agricoles et les couverts culturaux et inter-culturaux pour lutter contre l'aléa érosion hydrique des sols. Cette évolution nécessite de maintenir ou de réhabiliter les prairies.

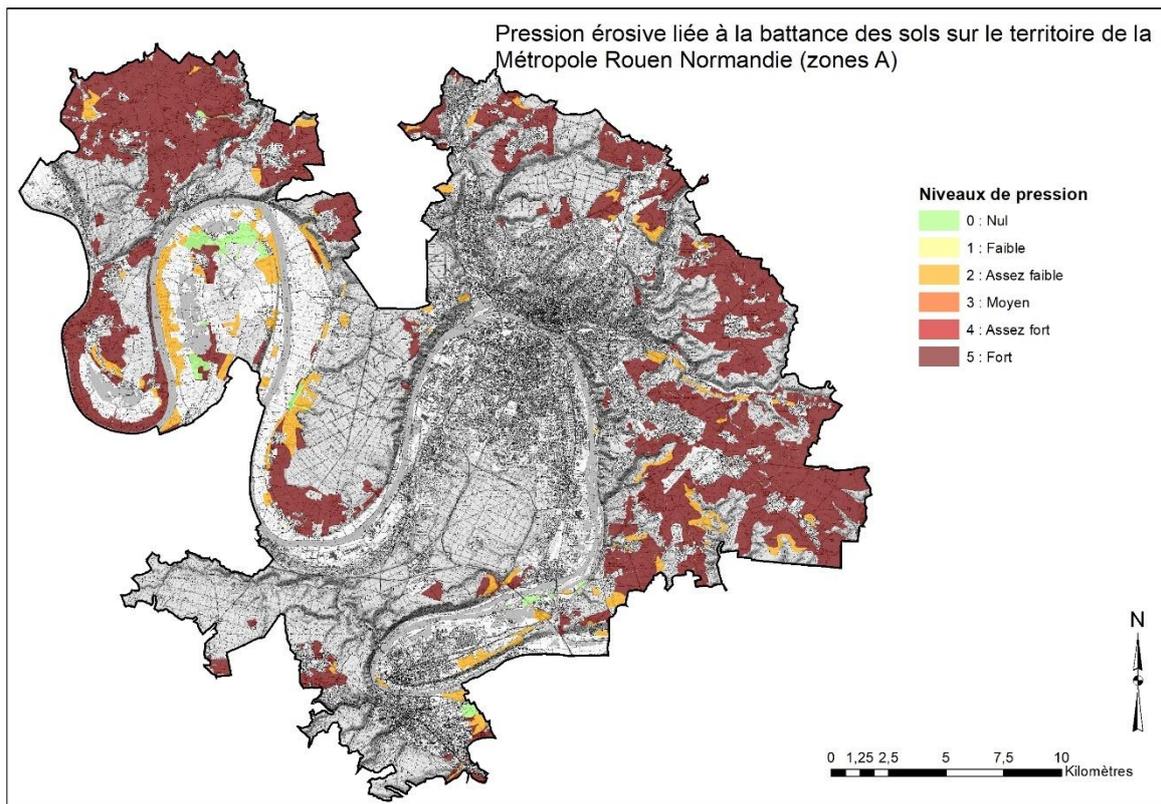


Fig. 111 : Carte de la pression érosive liée à la battance des sols (zone A)

Valeurs	Qualificatifs	Pression_Battance	
		Ha	%
0	Nul	0,0	0,0
1	Faible	444,0	2,7
2	Assez faible	1 985,0	12,1
3	Moyen	0,0	0,0
4	Assez fort	0,0	0,0
5	Fort	14 028,0	85,2
		16 457,0	100,0

Fig. 112 : Surfaces associées aux niveaux de pression érosive liée à la battance des sols (zone A)

### 3.1.4. La sensibilité potentielle des milieux à l'érosion

La pression érosive des milieux générée par la prise en compte concomitante des pratiques culturales, du relief et des sols atteste d'une sensibilité assez forte des espaces agricoles à l'érosion hydrique (cf. Fig.113). Les territoires les plus concernés par ce processus couvrent une superficie de 9 400 ha, soit un peu plus d'1 ha sur 2 en zone agricole (cf. Fig.114). Sur les plateaux et les bas de versant de la Seine marqués par des niveaux de sensibilité 4 et 5, ce sont les sols (textures battantes) et les rotations culturales (rotations culturales marquées par un recouvrement végétal du sol assez tardif) qui portent ces valeurs. Sur les rebords de plateau, la déclivité des versants conditionne la forte sensibilité des milieux à l'érosion hydrique.

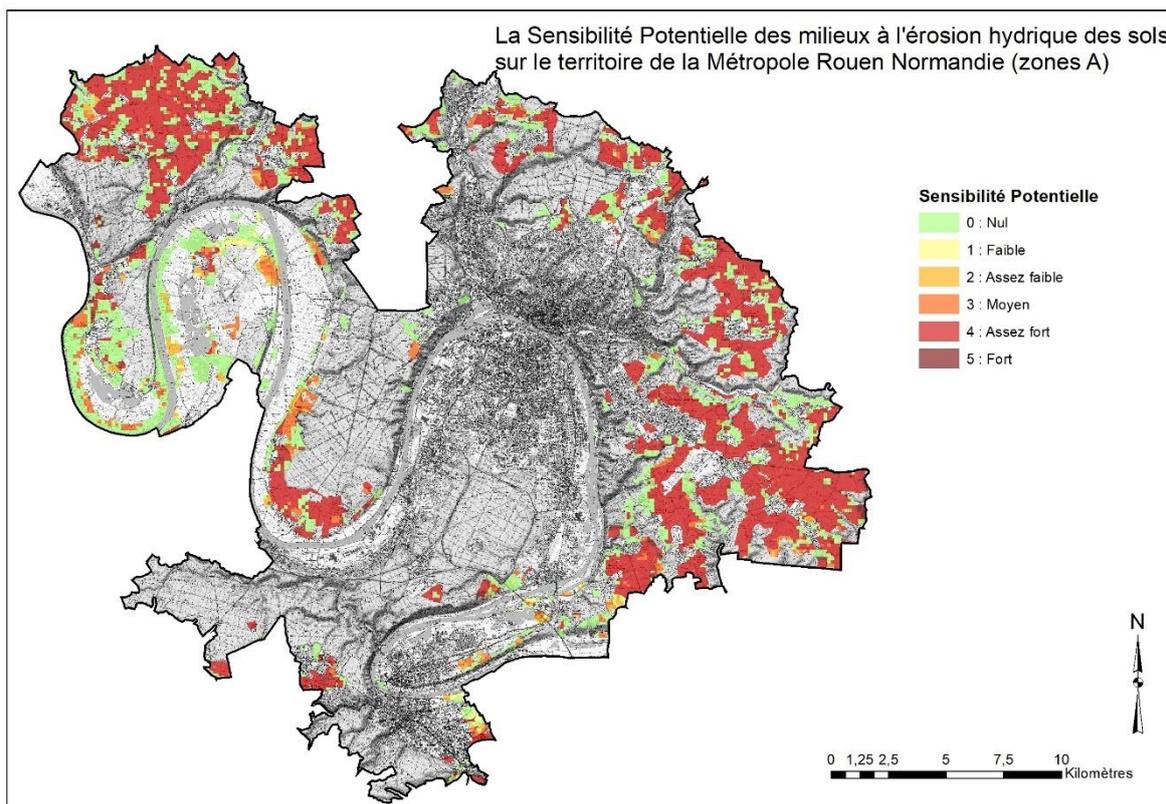


Fig. 113 : Carte de la sensibilité potentielle des milieux à l'érosion hydrique des sols (zone A)

Valeurs	Qualificatifs	Sensibilité Potentielle des Milieux (SPM)*	
		Ha	%
0	Nul	5 587,9	34,0
1	Faible	188,3	1,1
2	Assez faible	362,3	2,2
3	Moyen	934,1	5,7
4	Assez fort	9 049,8	55,0
5	Fort	334,2	2,0
		16 457	100,0

Fig. 114 : Surfaces associées aux niveaux de sensibilité potentielle des milieux à l'érosion hydrique (zone A)

### 3.2. L'érosivité pluviale

Le nombre de pluies journalières cumulant au moins 10 mm de précipitations pendant la période hydrologiquement active (octobre à mars) et l'importance des surplus hydrologiques générés pendant cette même période permettent de définir la contribution relative de l'érosivité pluviale dans l'estimation de l'aléa érosion hydrique. **Les résultats obtenus indiquent que les contextes climatique et pédo-climatique ne renforcent pas la capacité réelle des milieux à dégrader les sols** (cf. Fig.115). L'érosivité pluviale faible à assez faible couvre 60% des zones A, les autres surfaces relevant d'un niveau moyen en raison de surplus hydrologiques plus conséquents (cf. Fig.116).

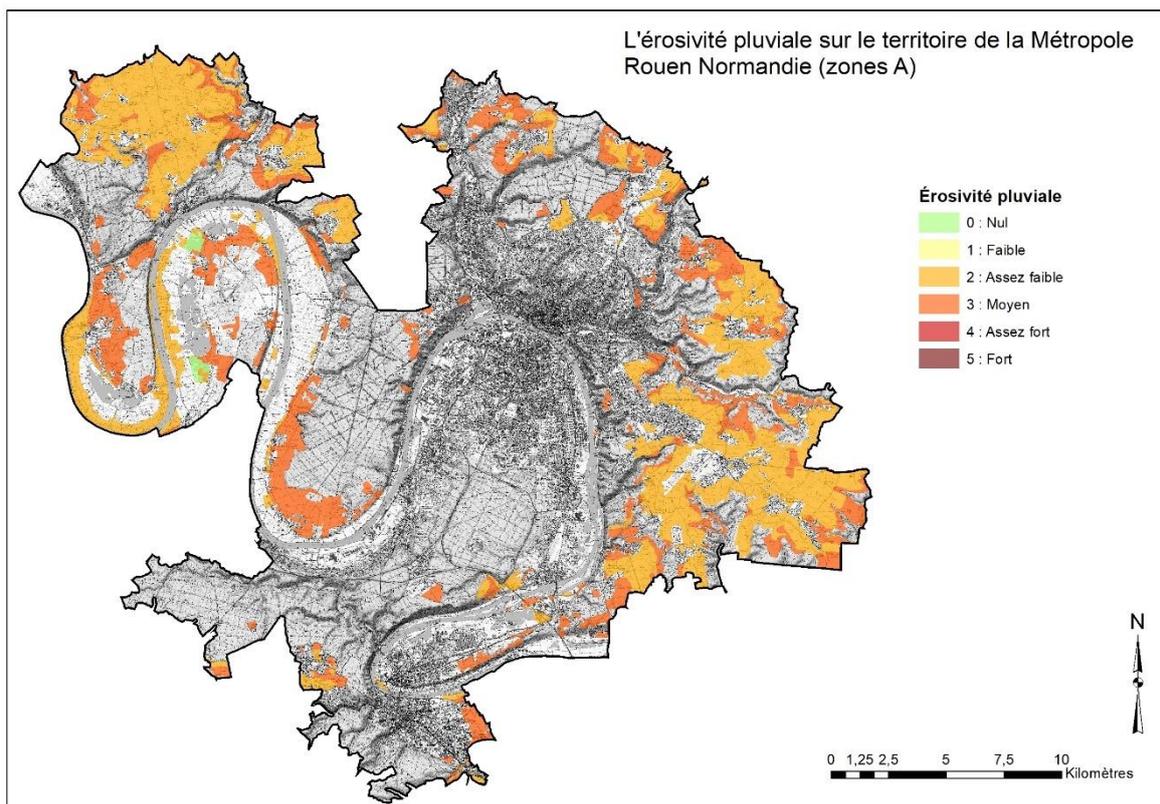


Fig. 115 : Carte de l'érosivité pluviale (zone A)

Valeurs	Qualificatifs	Érosivité pluviale	
		Ha	%
0	Nul	157,6	1,0
1	Faible	0,0	0,0
2	Assez faible	9 670,4	58,8
3	Moyen	6 628,6	40,3
4	Assez fort	0,0	0,0
5	Fort	0,0	0,0
		16 457	100,0

Fig. 116 : Surfaces associées à l'érosivité pluviale (zone A)

### 3.3. L'aléa érosion des sols en zone A et la prédisposition à l'aléa en zone N

La détermination des niveaux d'aléa de l'érosion hydrique selon le modèle SCALES retranscrit l'impact possible des composantes physiques et humaines du milieu et de leurs interactions sur le déclenchement d'un processus de dégradation des sols lié aux pluies. **Les surfaces agricoles du territoire de la Métropole Rouen Normandie caractérisées par un aléa moyen à assez faible (cf. Fig.117) représentent une superficie de 6 400 ha (40% des espaces en zone A).**

Les sols agricoles associés à un aléa nul (cf. Fig.118) couvrent également une superficie importante (7 410 ha). Ils concernent tous les secteurs en herbe et ceux dépourvus de pente permettant le développement de flux hydriques érosifs.

Pour autant, les enjeux sous-tendus par ce phénomène de dégradation des sols ne doivent pas être écartés des réflexions relatives à la planification territoriale en matière d'environnement. En effet, les résultats de ce travail montrent que l'aléa érosion hydrique est considéré comme assez fort pour des surfaces agricoles non négligeables couvrant un peu plus de 2 600 ha, soit 15% des secteurs en zone A.

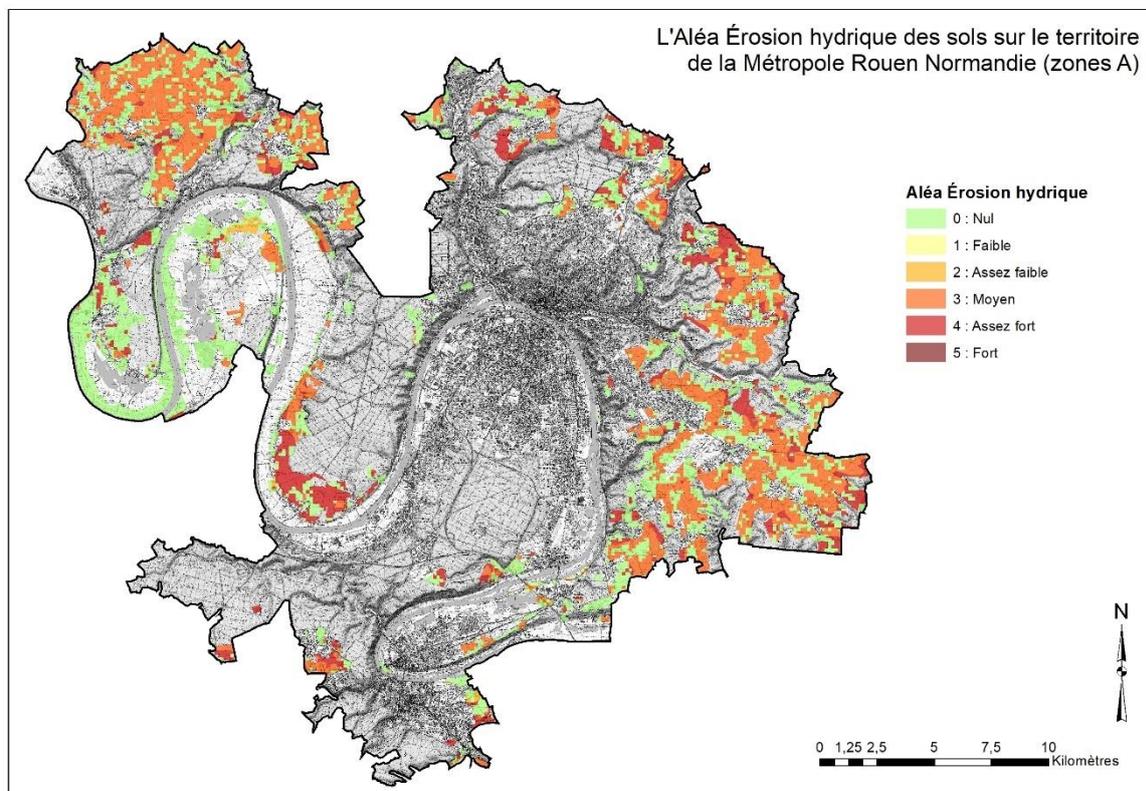


Fig. 117 : Carte de l'aléa érosion hydrique des sols sur le territoire métropolitain (zone A)

Aléa Érosion SCALES			
Valeurs	Qualificatifs	Ha	%
0	Nul	7 410,4	45,0
1	Faible	0,0	0,0
2	Assez faible	120,6	0,7
3	Moyen	6 321,1	38,4
4	Assez fort	2 604,5	15,8
5	Fort	0,0	0,0
		16 457	100,0

Fig. 118 : Surfaces associées aux niveaux de l'aléa érosion hydrique des sols (zone A)

Ne disposant pas de données suffisamment fiables sur les usages des surfaces en zone N, nous avons écarté ce paramètre d'entrée du modèle SCALES. Aussi, nous éviterons toute comparaison avec les résultats obtenus précédemment en zone A et traiterons l'aléa érosion en mobilisant la notion de prédisposition à cet aléa.

La prise en compte des caractéristiques topographiques et édaphiques des surfaces en zone N permettent de définir une sensibilité potentielle relative des milieux à l'érosion hydrique (cf. Fig.119). Celle-ci est nulle à assez faible pour 70% des surfaces en raison de l'importance des secteurs à pente nulle ou très faible (basse vallée de la Seine) et de sols dont les textures ne sont pas ou peu sensibles

à la battance (cf. Fig.120). Les niveaux de sensibilité les plus élevés (4 et 5) concernent près d'1 ha sur 4. Ils sont associés à des surfaces à forte ou très forte déclivité spécifiques aux ruptures de pente de rebord de plateau et aux versants de la vallée de la Seine exposés sud et ouest.

Les niveaux d'érosivité pluviale peuvent être comparés à ceux estimés en zone A car les données d'entrée sont analogues. Les résultats diffèrent peu en zone naturelle. Si le niveau moyen est un peu plus important que pour les surfaces agricoles, cela tient principalement à des surplus hydrologiques plus abondants qui s'expliquent par la présence plus marquée de sols dont les RU sont faibles.

**Finalement, il ressort de ces résultats intermédiaires une prédisposition à l'aléa érosion hydrique qui doit être considérée avec attention puisqu'elle apparaît assez forte sur 20% des surfaces en zone N, ce qui représente une superficie conséquente de 1 366 ha.** Il est fort probable que des connaissances actualisées sur les usages des sols mettraient en évidence une large majorité de situations en couvertures végétales pérennes, ce qui réduirait substantiellement la proportion des surfaces à prédisposition assez forte. Néanmoins, ces résultats montrent que des usages tournés vers une protection végétale insuffisante des sols pourraient déboucher sur une vulnérabilité accrue face à l'érosion hydrique.

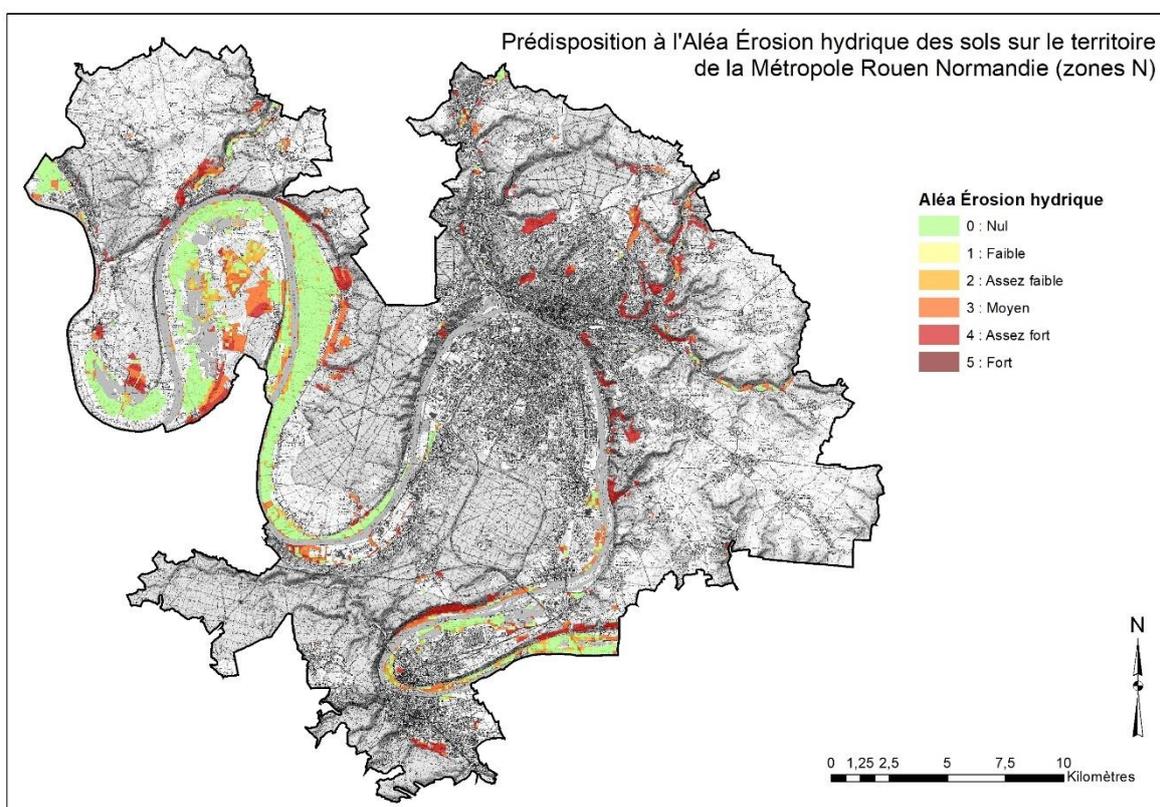


Fig. 119 : Carte de la prédisposition à l'aléa érosion hydrique des sols sur le territoire métropolitain (zone N)

Valeurs	Qualificatifs	Sensibilité Potentielle des Milieux (SPM)*		Érosivité pluviale		Prédisposition Aléa Érosion SCALES	
		Ha	%	Ha	%	Ha	%
0	Nul	3 424,2	52,9	0,0	0,0	3 424,2	52,9
1	Faible	195,3	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	Assez faible	823,7	12,7	3 470,8	53,6	471,0	7,3
3	Moyen	482,6	7,5	2 999,8	46,4	1 209,0	18,7
4	Assez fort	1 053,5	16,3	0,0	0,0	1 366,4	21,1
5	Fort	491,3	7,6	0,0	0,0	0,0	0,0
		6 471	100,0	6 471	100,0	6 471	100,0

\* Combinaison des paramètres Pente et Sensibilité à la battance

Fig. 120 : Surfaces associées à sensibilité potentielle des milieux à l'érosion hydrique, à l'érosivité pluviale et aux niveaux de prédisposition à l'aléa érosion hydrique des sols (zone N)

## 4. La multifonctionnalité des sols

### 4.1. Fonctions et multifonctionnalité en zones A, N, AU et UP/URP

#### 4.1.1. La fonction de production de biomasse

Comme indiqué dans la partie consacrée à la méthodologie de l'outil MUSE, la fonction de production de biomasse est une déclinaison des données issues de la modélisation SQUAT concernant les potentialités agronomiques des sols en contexte d'agriculture conventionnelle. Par conséquent, les résultats ci-dessous diffèrent légèrement de ceux obtenus avec SQUAT concernant la représentation spatiale des productions de biomasse les plus faibles (notes comprises entre 1 et 3).

La cartographie de cette fonction en 5 classes fait ressortir 3 entités territoriales distinctes (cf. Fig.121).

- La première correspond aux secteurs de plateau pour lesquels la production de biomasse des sols est optimale (notes 4 et 5). Elle couvre un peu plus de 3 700 ha des surfaces en zones A, N, AU et UP/URP, soit 33% de la superficie totale.

- A l'opposé, les secteurs de versants à forte pente (versants exposés au sud et à l'ouest), de rupture de pente de rebord de plateau et de bas de versants de la vallée de la Seine reposant sur les anciennes terrasses alluviales renvoient aux productions de biomasse les plus faibles (notes 1 et 2). Ces secteurs représentent le cas le plus fréquent sur le territoire métropolitain. Ils occupent 9 350 ha, soit 40% de la superficie totale. La méthode MUSE ne prévoit pas d'analyse adaptée aux sols pionniers calcicoles ou silicicoles présents sur le territoire de la Métropole Rouen Normandie, notamment pour les milieux calcicoles sur les versants. Aussi, ce résultat est à relativiser car il ne rend pas compte de la production de biomasse autre que dans un système agricole conventionnel, ce qui n'est pas applicable sur ces sols pionniers.

- La dernière entité correspond aux secteurs dont les sols attestent d'une production de biomasse moyenne. On les retrouve principalement sur les rebords de plateau à pente modérée et dans la basse vallée de la Seine tapissée par les alluvions récentes. Ils s'étendent sur près de 6 400 ha (27% de la superficie totale des zones A, N, AU et UP/URP).

Ces résultats globaux montrent de fortes disparités de résultats selon les différentes zones.

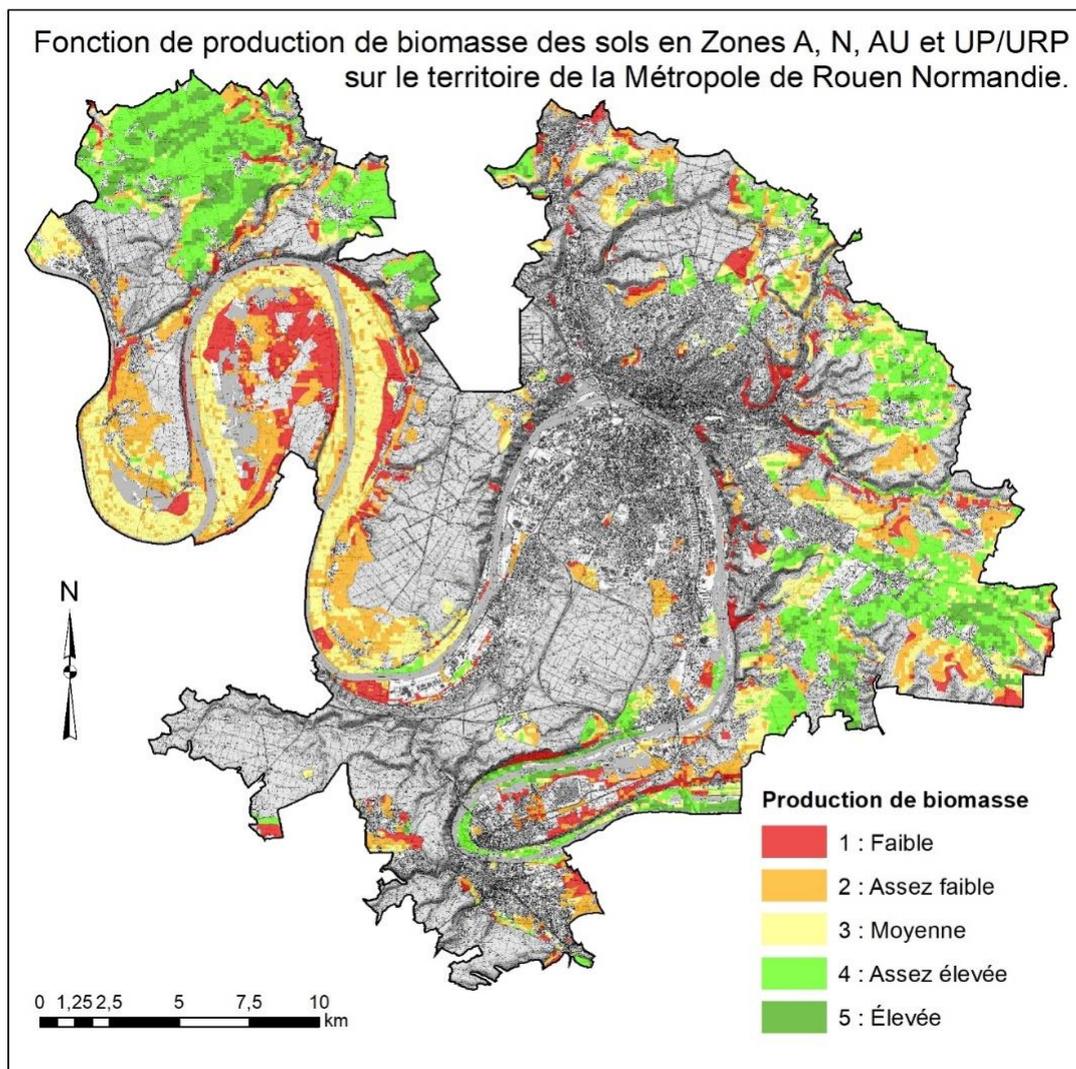


Fig. 121 : Carte de la fonction de production de biomasse sur le territoire métropolitain

La comparaison des valeurs de production de biomasse par zone du PLU rend compte de situations très contrastées (cf. Fig.122).

C'est en **zone A** que l'on observe les valeurs les plus élevées, ce qui semble logique au regard de l'usage des sols. Elles couvrent 7 000 ha, soit 43% des surfaces agricoles. A noter que les sols ayant une fonction production de biomasse moyenne à faible s'étendent sur des superficies non négligeables (5 400 ha), ce qui représente près d'un tiers des surfaces agricoles.

Les résultats en **zone N** sont diamétralement opposés. Les sols les moins productifs sont largement dominants et en lien avec la géographie, la géologie et la topographie du territoire. Ils occupent une superficie de 3 500 ha et représentent 55% des surfaces naturelles. Seul 1 ha sur 10 est caractérisé par des productions de biomasse élevées soit l'équivalent de 700 ha des zones N. Le lien entre les coteaux et les milieux pionniers (calcoles ou silicoles) est traité dans la partie analyse.

Les données recueillies pour les **zones AU** révèlent une situation assez proche de celle décrite pour les zones N. 6 ha sur 10 sont caractérisés par une production de biomasse faible à assez faible alors que les surfaces les plus productives ne se rencontrent que dans 17% des cas (700 ha).

Le contexte le plus défavorable est bien celui que l'on observe pour les **zones UP/URP** puisque les productions de biomasse assez élevée et élevée ne concernent que 6 des 137 ha des 11 sites tests, soit un peu moins de 5% de la surface totale. Dans ce type de contexte, les sols présentent très majoritairement un niveau de production faible à assez faible. Ils couvrent 75% de la superficie en zone UP/URP la surface totale, soit 103 des 137 ha.

Zones A				Zones N			
		Potentiel agronomique				Potentiel agronomique	
Valeurs	Qualificatifs	Ha	%	Valeurs	Qualificatifs	Ha	%
1	Faible	1 622	9,9	1	Faible	1 914	29,7
2	Assez Faible	3 745	23,0	2	Assez Faible	1 575	24,4
3	Moyenne	3 913	24,0	3	Moyenne	2 259	35,0
4	Assez élevée	5 119	31,4	4	Assez élevée	413	6,4
5	Élevée	1 906	11,7	5	Élevée	286	4,4
		16 304	100,0			6 445	100,0

Zones AU				Zones UP/URP			
		Potentiel agronomique				Potentiel agronomique	
Valeurs	Qualificatifs	Ha	%	Valeurs	Qualificatifs	Ha	%
1	Faible	145	21,1	1	Faible	33	23,7
2	Assez Faible	248	35,9	2	Assez Faible	70	51,4
3	Moyenne	179	26,0	3	Moyenne	28	20,3
4	Assez élevée	113	16,4	4	Assez élevée	6	4,5
5	Élevée	3	0,5	5	Élevée	0	0,1
		689	100,0			137	100,0

Fig. 122 : Surfaces associées au potentiel agronomique de sols en zones A, N, AU et UP/URP

#### 4.1.2. La fonction de régulation du cycle de l'eau

La fonction de régulation du cycle de l'eau est approchée par la notion de potentiel des sols à permettre l'infiltration des eaux pluviales. Toutes zones confondues, la cartographie de cette fonction montre que le territoire de la MRN contribue positivement à la régulation du cycle de l'eau (cf. Fig.123). **Le potentiel d'infiltration assez élevé et élevé couvre un peu moins de 17 000 ha, ce qui représente 70% de la superficie totale des zones A, N, AU et UP/URP.** Par ailleurs, on note l'absence de situations défavorables à la bonne régulation du cycle de l'eau (valeurs 1 et 2 absentes).

Les potentiels d'infiltration les plus élevés sont étroitement associés aux secteurs délimitant certains bas de versants de la vallée de la Seine. Ils s'étendent sur 1 645 ha, ce qui correspond à 7% de la surface couverte par toutes les zones. Le niveau de régulation assez élevé couvre la plus grande partie du territoire (64%). Il correspond aux secteurs de plateau et à la plupart des bas de versant des vallées principales et secondaires. Dans 30% des situations, le potentiel d'infiltration est considéré comme moyen. Il est associé aux contextes de rebord de plateau et de fond de vallée de la Seine. Dans le cas des zones AU, ce potentiel moyen est plus spécifiquement imputable à la faible épaisseur des sols et à la proximité par rapport à la surface des argiles à silex imperméables.

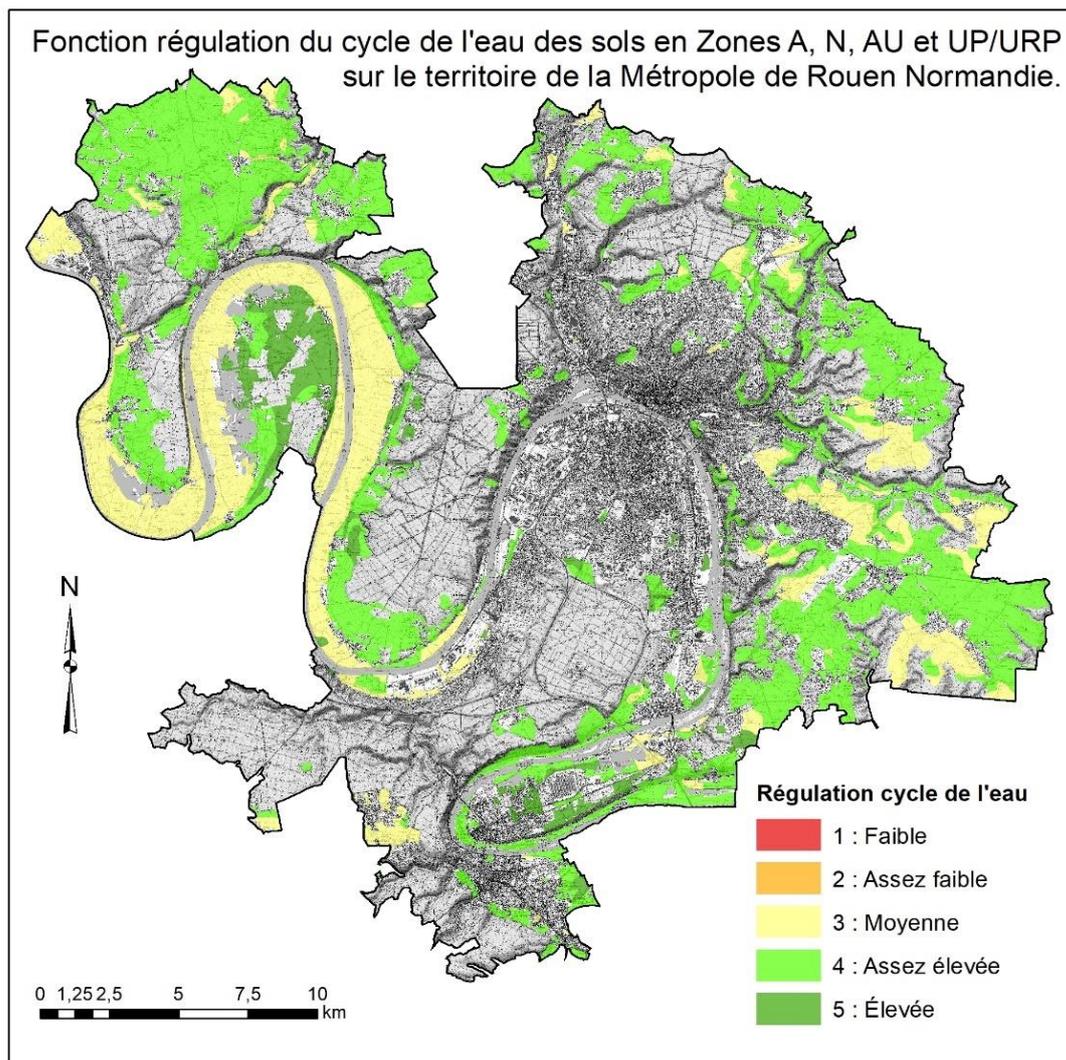


Fig. 123 : Carte de la fonction régulation du cycle de l'eau sur le territoire métropolitain

L'approche par zones révèle des contextes de régulation du cycle de l'eau assez différents (cf. Fig.124). Le potentiel d'infiltration considéré comme élevé est peu représenté en zone A puisqu'il ne concerne que 4% des surfaces agricoles. Il est plus fréquent en zone N (12,4%) et en zone AU (17,6%) et devient même la classe dominante en zone UP/URP (53,6%). Si on réunit les valeurs 4 et 5, on note alors que les secteurs les plus favorables sont à mettre en relation avec les 11 sites tests en zone UP/URP. Les surfaces à potentiel d'infiltration élevé et assez élevé caractérisent près de 90% de la superficie totale étudiée. Les territoires en zone A et AU sont également très favorables à la régulation du cycle de l'eau. En valeurs absolues, les secteurs en zone A constituent les principales surfaces étudiées contributives à la bonne infiltration des eaux pluviales. Ils couvrent une surface de 12 700 ha, ce qui représente 75% des surfaces de valeurs 4 et 5 toutes zones confondues.

Zones A				Zones N			
		Potentiel Infiltration				Potentiel Infiltration	
Valeurs	Qualificatifs	Ha	%	Valeurs	Qualificatifs	Ha	%
1	Faible	0	0,0	1	Faible	0	0,0
2	Assez Faible	0	0,0	2	Assez Faible	0	0,0
3	Moyenne	3 599	22,1	3	Moyenne	3 176	49,3
4	Assez élevée	12 051	73,9	4	Assez élevée	2 474	38,4
5	Élevée	654	4,0	5	Élevée	796	12,4
		16 304	100,0			6 445	100,0

Zones AU				Zones UP/URP			
		Potentiel Infiltration				Potentiel Infiltration	
Valeurs	Qualificatifs	Ha	%	Valeurs	Qualificatifs	Ha	%
1	Faible	0	0,0	1	Faible	0	0,0
2	Assez Faible	0	0,0	2	Assez Faible	0	0,0
3	Moyenne	146	21,1	3	Moyenne	15	11,0
4	Assez élevée	422	61,2	4	Assez élevée	48	35,4
5	Élevée	122	17,6	5	Élevée	73	53,6
		689	100,0			137	100,0

Fig. 124 : Surfaces associées au potentiel d'infiltration de sols en zones A, N, AU et UP/URP

#### 4.1.3. La fonction de réservoir de carbone

La cartographie de cette fonction témoigne de la faible capacité fonctionnelle du territoire métropolitain à séquestrer du carbone (cf. Fig.125). Les résultats obtenus indiquent que les surfaces caractérisées par un réservoir de carbone assez élevé et élevé ne représentent 3% de la totalité des surfaces A, N, AU et UP/URP étudiées.

Ces surfaces sont localisées de manière disséminée dans la vallée de la Seine et les versants pentus des vallées secondaires. Les autres secteurs renvoient à part égale à des niveaux de séquestration du carbone moyen et assez faible, ce qui correspond respectivement à 50% et 47% de la superficie totale. **Les territoires à réservoir de carbone moyen sont localisés sur les rebords de plateau et en basse vallée de la Seine et sont fréquemment associés à la présence de prairies.** Les sols à réservoir assez faible occupent tous les secteurs de plateau voués principalement aux cultures et une partie des bas de versant de la vallée de la Seine.

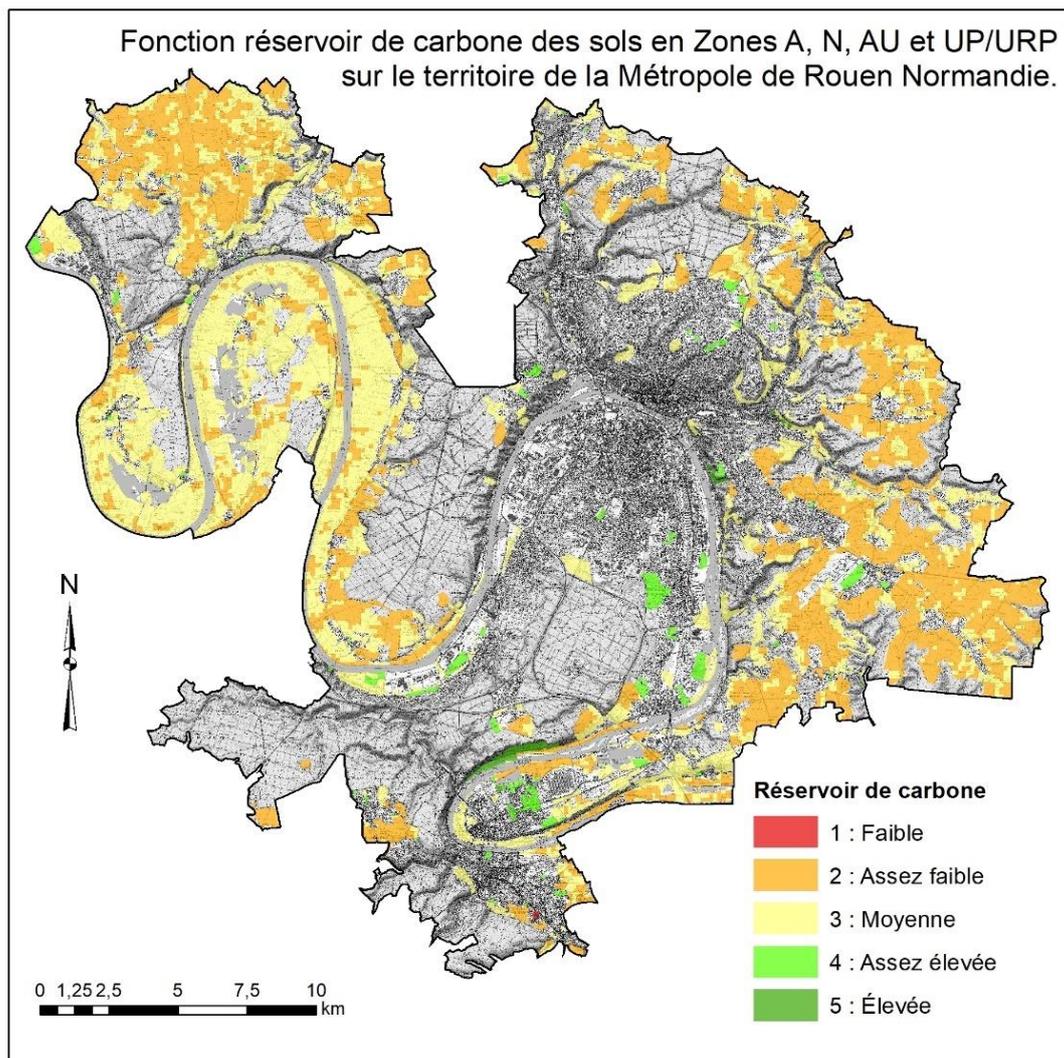


Fig. 125 : Carte de la fonction réservoir de carbone sur le territoire métropolitain

En comparant les valeurs par zone, on note que ce sont les territoires en zone AU et UP/URP qui portent les réservoirs de carbone les plus élevés (cf. Fig.126).

Dans ce type de contexte, les surfaces à réservoir assez élevé représentent respectivement 75% et 80% de la superficie totale de chacune de ces deux zones. Les secteurs en zones A et N s'illustrent par des réservoirs de carbone assez faibles pour les premiers et moyens pour les seconds. Les espaces agricoles renvoient majoritairement au niveau assez faible alors que les espaces naturels sont associés à des réservoirs moyens sur près de 80% de la superficie totale. C'est dans ce contexte naturel que nous avons identifié quelques secteurs à capacité de séquestration du carbone élevée (119 ha).

Zones A				Zones N			
		Réservoir Carbone				Réservoir Carbone	
Valeurs	Qualificatifs	Ha	%	Valeurs	Qualificatifs	Ha	%
1	Faible	0	0,0	1	Faible	0	0,0
2	Assez Faible	9 786	60,0	2	Assez Faible	1 185	18,4
3	Moyenne	6 518	40,0	3	Moyenne	5 141	79,8
4	Assez élevée	0	0,0	4	Assez élevée	0	0,0
5	Élevée	0	0,0	5	Élevée	119	1,8
		16 304	100,0			6 445	100,0

Zones AU				Zones UP/URP			
		Réservoir Carbone				Réservoir Carbone	
Valeurs	Qualificatifs	Ha	%	Valeurs	Qualificatifs	Ha	%
1	Faible	0	0,0	1	Faible	5	3,3
2	Assez Faible	74	10,8	2	Assez Faible	0	0,0
3	Moyenne	97	14,0	3	Moyenne	23	16,7
4	Assez élevée	518	75,2	4	Assez élevée	110	80,0
5	Élevée	0	0,0	5	Élevée	0	0,0
		689	100,0			137	100,0

Fig. 126 : Surfaces associées au réservoir de carbone des sols en zones A, N, AU et UP/URP

#### 4.1.4. La fonction de réservoir de biodiversité des sols

Si le territoire métropolitain en zones A, N, AU et UP/URP est marqué par une capacité de séquestration du carbone assez limitée, c'est l'inverse en ce qui concerne la fonction de réservoir de biodiversité des sols (cf. Fig.127). 99% des surfaces témoignent de valeurs assez élevées et élevées dans des proportions comparables. Les espaces de valeur assez élevée (11 168 ha) occupent majoritairement les secteurs de plateau et secondairement les bas de versant de la vallée de la Seine. Les réservoirs de biodiversité des sols les plus élevés (12 140 ha) s'étendent sur les versants pentus des vallées principales et secondaires, sur certains rebords de plateau et en basse vallée de la Seine.

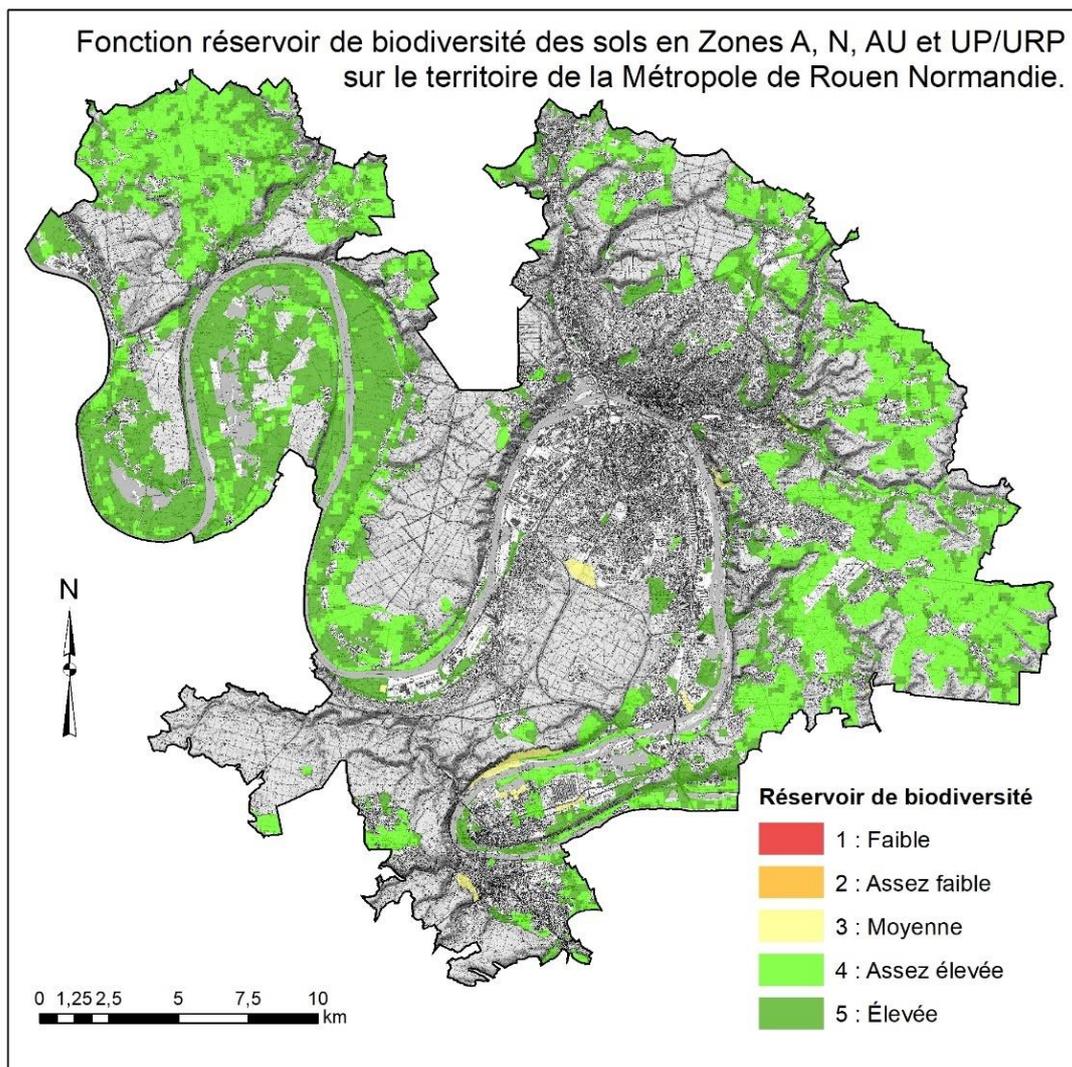


Fig. 127 : Carte de la fonction de réservoir de biodiversité des sols sur le territoire métropolitain

Ce sont les espaces en zone A (cf. Fig.128) qui portent les surfaces les plus étendues à réservoir élevé de biodiversité (6 516 ha), juste devant les secteurs en zone N (5 125 ha). Toutefois, en valeurs relatives, la proportion la plus forte de territoire caractérisé par un réservoir de biodiversité élevé revient aux espaces naturels (près de 80% de la surface totale). C'est également en zone AU que la part des surfaces à réservoir élevé est très importante puisqu'elle représente près de 72% des secteurs ouverts à l'urbanisation. Les territoires qui rendent compte d'un réservoir moyen de biodiversité des sols concernent principalement les zones AU et N. Ils s'étendent respectivement sur 121 et 119 ha. Cependant, en proportion, ces surfaces demeurent très marginales en zone N (2% de la superficie totale) et apparaissent significatives en zone AU (près de 1 ha sur 5).

Zones A				Zones N			
Réserve Biodiv. du sol				Réserve Biodiv. du sol			
Valeurs	Qualificatifs	Ha	%	Valeurs	Qualificatifs	Ha	%
1	Faible	0	0,0	1	Faible	0	0,0
2	Assez Faible	0	0,0	2	Assez Faible	0	0,0
3	Moyenne	0	0,0	3	Moyenne	119	1,8
4	Assez élevée	9 788	60,0	4	Assez élevée	1 202	18,6
5	Élevée	6 516	40,0	5	Élevée	5 125	79,5
		<b>16 304</b>	<b>100,0</b>			<b>6 445</b>	<b>100,0</b>

Zones AU				Zones UP/URP			
Réserve Biodiv. du sol				Réserve Biodiv. du sol			
Valeurs	Qualificatifs	Ha	%	Valeurs	Qualificatifs	Ha	%
1	Faible	0	0,0	1 (0)	Faible	5	3,3
2	Assez Faible	0	0,0	2	Assez Faible	0	0,0
3	Moyenne	121	17,5	3	Moyenne	23	16,7
4	Assez élevée	74	10,8	4	Assez élevée	105	76,3
5	Élevée	494	71,7	5	Élevée	5	3,7
		<b>689</b>	<b>100,0</b>			<b>137</b>	<b>100,0</b>

Fig. 128 : Surfaces associées au réservoir de biodiversité des sols en zones A, N, AU et UP/URP

#### 4.1.5. La multifonctionnalité des sols

La combinaison des fonctions « Production de biomasse », « Régulation du cycle de l'eau », « Réservoir de carbone » et « Réservoir de biodiversité des sols » permet d'estimer une valeur globale de la multifonctionnalité des sols. Celle-ci reprend la classification et la qualification adoptées pour chacune des 4 fonctions dont la sommation des valeurs permet d'obtenir la note finale de la multifonctionnalité.

Le rendu cartographique ci-dessous rend compte d'un territoire métropolitain occupé majoritairement par une multifonctionnalité assez élevée (cf. Fig.129). Elle couvre 13 811 ha, soit 58,6% des surfaces étudiées toutes zones confondues. En associant à ces surfaces celles marquées par une multifonctionnalité élevée, c'est un peu plus de 60% de la Métropole Rouen Normandie en zones A, N, AU et UP/URP qui témoignent d'une bonne multifonctionnalité. Ces surfaces sont localisées préférentiellement dans les parties centrales des secteurs de plateau, en position de bas de versant de la vallée de la Seine et dans le lit majeur du fleuve.

Les surfaces correspondantes à une multifonctionnalité moyenne ne sont pas négligeables puisqu'elles représentent 8 690 ha, soit 37% de la superficie totale étudiée. Elles occupent les parties périphériques des secteurs de plateau, les versants à pente forte des vallées principales et secondaires et les zones de jonction entre la basse vallée de la Seine et ses bas de versant.

Les territoires à multifonctionnalité assez faible et faible sont très marginaux. Ils concernent respectivement 1,5 et 0,02 % de la surface totale étudiée toutes zones confondues (345 ha et 4,6 ha).

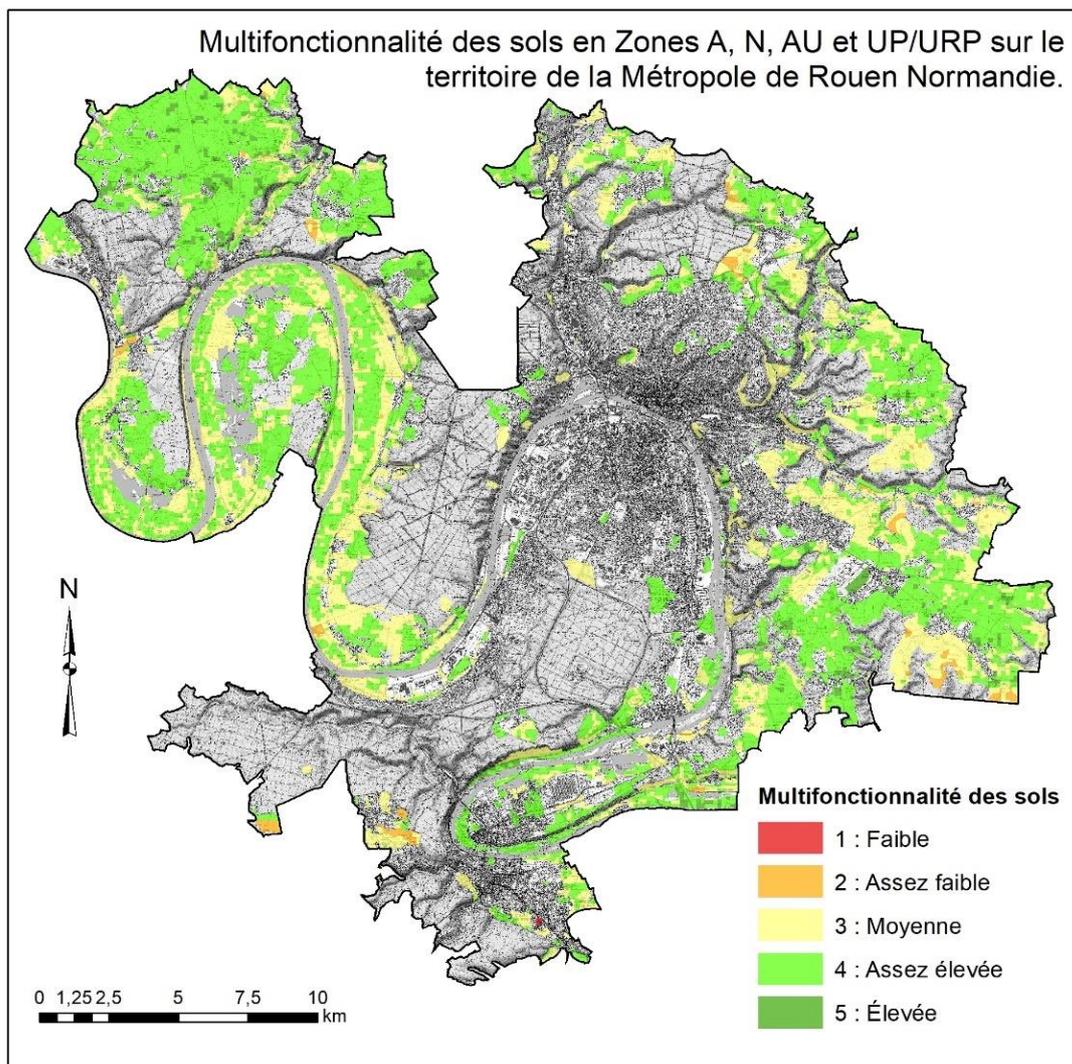


Fig. 129 : Carte de la multifonctionnalité des sols sur le territoire métropolitain

Les zones A du PLU comportent des territoires à multifonctionnalité assez élevée et élevée (cf. Fig.130). Les surfaces correspondantes couvrent une superficie de 10 251 ha, soit 43% des zones A, N, AU et UP/URP. Viennent ensuite les espaces naturels avec 3 686 ha de sols de même valeur de multifonctionnalité, ce qui équivaut à 15% de la superficie toutes zones confondues. Par conséquent, la probabilité d'affecter les sols de bonne qualité multifonctionnelle par des projets d'urbanisation apparaît plus élevée.

Les résultats par zone soulignent également l'importance de la classe 3 relative à la multifonctionnalité moyenne. En zones naturelle et agricole, elle représente respectivement 42,3% et 35,2% de la surface totale. Elle atteint également 29% en zone AU. En valeurs absolues, les secteurs concernés par une multifonctionnalité moyenne occupent une surface non négligeable de 8 690 ha, soit un peu plus d'1 ha sur 3 du territoire métropolitain. En l'état, il est difficile d'orienter la planification urbaine puisque les enjeux de développement durable autour de ces secteurs ne sont pas bien identifiés par l'outil MUSE. C'est la raison pour laquelle, à titre exploratoire, nous avons essayé de désagréger la classe 3 de MUSE pour faire ressortir les secteurs pour lesquels certaines des 4 fonctions initiales de MUSE doivent être considérées avec attention en raison de leur efficacité.

Zones A				Zones N			
Valeurs	Qualificatifs	MUSE		Valeurs	Qualificatifs	MUSE	
		Ha	%			Ha	%
1	Faible	0	0,0	1	Faible	0	0,0
2	Assez Faible	313	1,9	2	Assez Faible	32	0,5
3	Moyenne	5 740	35,2	3	Moyenne	2 728	42,3
4	Assez élevée	9 708	59,5	4	Assez élevée	3 578	55,5
5	Élevée	543	3,3	5	Élevée	108	1,7
		<b>16 304</b>	<b>100,0</b>			<b>6 445</b>	<b>100,0</b>

Zones AU				Zones UP/URP			
Valeurs	Qualificatifs	MUSE		Valeurs	Qualificatifs	MUSE	
		Ha	%			Ha	%
1	Faible	0	0,0	1	Faible	5	3,4
2	Assez Faible	0	0,0	2	Assez Faible	0	0,0
3	Moyenne	199	28,9	3	Moyenne	23	17,1
4	Assez élevée	417	60,4	4	Assez élevée	109	79,5
5	Élevée	74	10,7	5	Élevée	0	0,0
		<b>689</b>	<b>100,0</b>			<b>137</b>	<b>100,0</b>

Fig. 130 : Surfaces associées à la multifonctionnalité des sols en zones A, N, AU et UP/URP

## 4.2. Désagrégation de la classe 3 de MUSE : approche exploratoire en zone AU

Une démarche de désagrégation de la classe 3 de MUSE a été menée à titre d'exemple en zone AU. Les secteurs concernés par une multifonctionnalité moyenne représentent 199 ha. Pour chacun des secteurs, nous avons identifié la ou les fonctions initiales dont les valeurs de fonctionnalité sont élevées ou assez élevées (valeurs 4 et 5). Cette étape a permis de dresser une typologie des fonctions efficaces au sein de la classe 3 de MUSE (cf. Fig.131).

En première approche, on note que tous les secteurs de classe 3 attestent d'une ou de deux fonctions de valeurs élevées ou assez élevées. Les secteurs caractérisés par une seule fonction efficace représentent le cas de figure le plus courant. Ils font valoir des qualités fonctionnelles liées à la régulation du cycle de l'eau (108 ha, 54,3% de la surface totale) et au réservoir de biodiversité (44 ha, 22,1% de la surface totale). Les secteurs marqués par deux fonctions efficaces sont donc minoritaires (23,6% des surfaces AU de classe 3). Les fonctions associées de Régulation du cycle de l'eau et de Réservoir de biodiversité des sols, d'une part, et de Régulation du cycle de l'eau et de Réservoir de carbone, d'autre part, illustrent les combinaisons les plus fréquentes (respectivement 16,6% et 6,5% de la surface totale). Nous avons relevé également l'association des fonctions Production de biomasse et Réservoir de biodiversité des sols attestant de valeurs 4 et 5. Cette situation est toutefois très marginale puisqu'elle ne concerne qu'1 seul ha sur les 199 ha de classe 3.

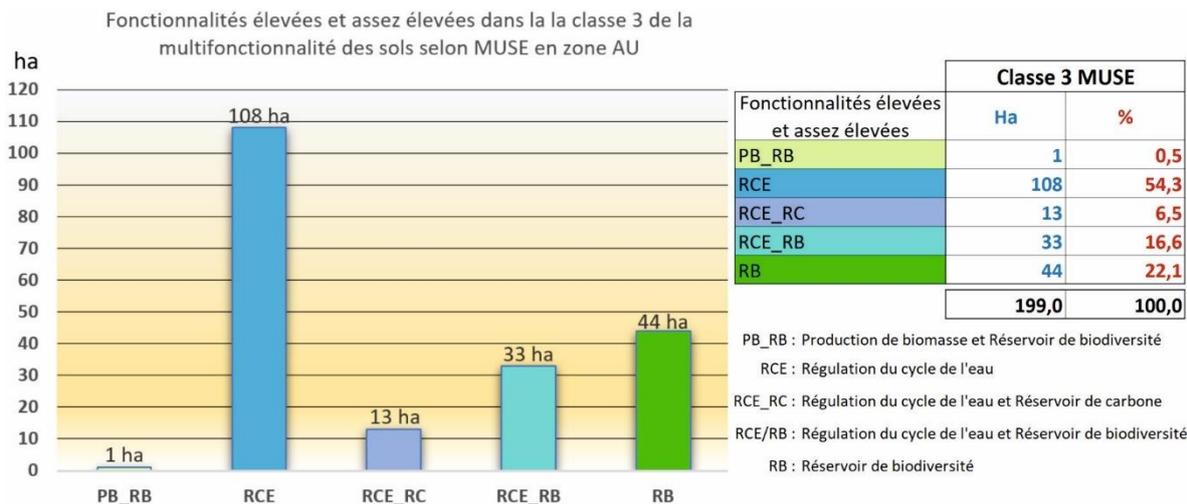


Fig. 131 : Fonctionnalités assez élevées et élevées dans la classe 3 de la multifonctionnalité des sols (zone AU)

A titre d'exemple, nous proposons ci-dessous une représentation cartographique de la désagrégation de la classe 3 de MUSE centrée sur la commune de Oissel (cf. Fig.132). Ces premiers résultats montrent qu'il est possible de mieux valoriser les secteurs de fonctionnalité moyenne en matière d'aménagement du territoire. Il nous semblerait opportun de pouvoir généraliser cette démarche à l'ensemble des zones agricoles et naturelles de la métropole.

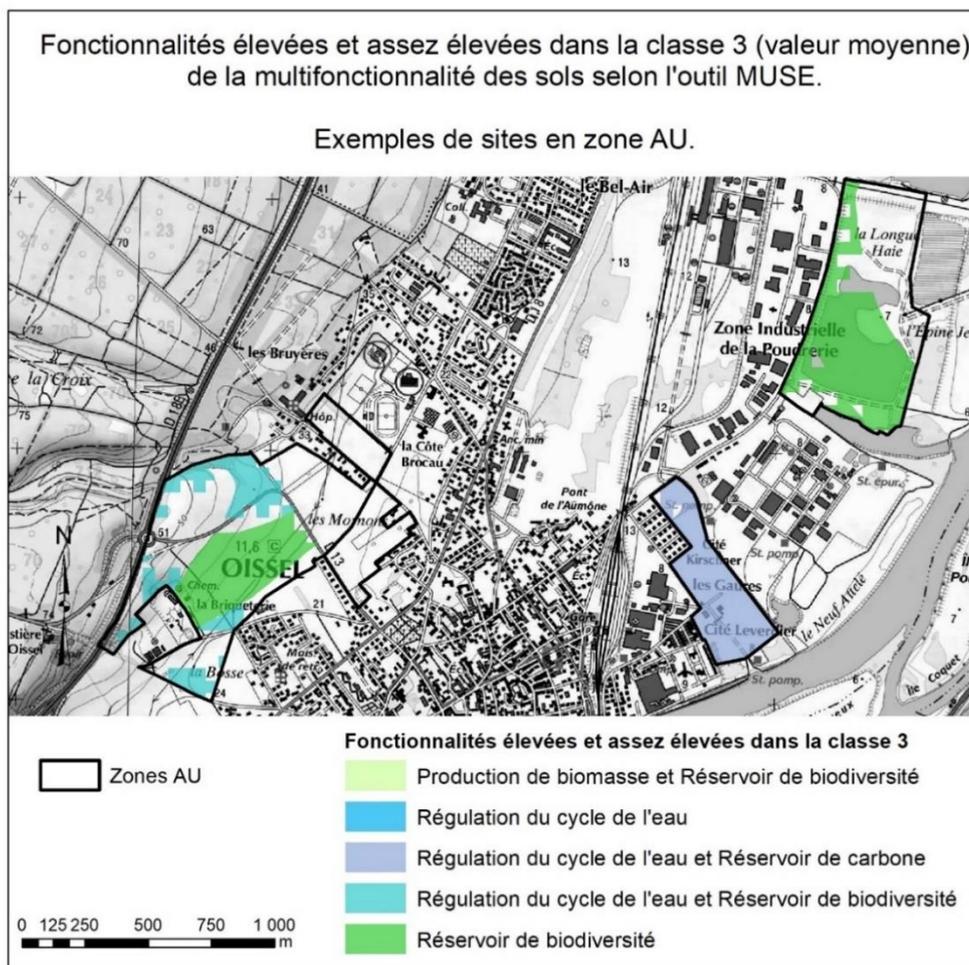


Fig. 132 : Fonctionnalités assez élevées et élevées dans la classe 3 de la multifonctionnalité des sols. Exemple de sites en zone AU

### 4.3. La capacité fonctionnelle des sols en milieu urbain

La capacité fonctionnelle des sols en milieu urbain traduit l'aptitude des sols à exercer toute ou partie des fonctions associées à un sol naturel. L'outil MUSE propose de la déterminer en se basant sur l'occupation dominante des sols à partir de deux types de données issues de Corine land Cover Haute Résolution produites par Copernicus : la couche imperméabilisation et la couche densité du couvert arboré. Ces deux couches découpent le territoire en mailles de 10 m de côté auxquelles est associé un pourcentage d'imperméabilisation et de couverture arborée.

Pour chaque maille, lorsque le % égale ou dépasse le seuil de 50%, la nature de l'information correspondante devient dominante. Dans ce cas, elle qualifie l'intégralité de la maille. Ainsi, une maille indiquant un % de couverture arborée de 55% sera considérée pour l'ensemble de sa surface comme arborée et comme ayant une capacité fonctionnelle optimale. Une maille caractérisée par un niveau d'imperméabilisation de 63% sera qualifiée d'imperméabilisée sur l'ensemble de sa surface et sera associée à une capacité fonctionnelle nulle.

Concernant la capacité fonctionnelle intermédiaire des mailles, elle relève d'une double condition : le % des mailles de la couche imperméabilisation doit être compris entre 25 et 49% et dans le même temps le % des mailles de la couche densité du couvert arboré doit aussi se situer entre 25 et 49%.

#### 4.3.1. L'imperméabilisation des sols sur le territoire de la MRN

La représentation de l'imperméabilisation des sols à l'échelle de la Métropole Rouen Normandie à partir des données Copernicus et selon un maillage de 10 m x 10 m permet de bien faire ressortir en rouge foncé le tissu urbain du territoire (cf. Fig.133). Celui-ci est structuré autour de Rouen et sa première couronne, le long de la Seine entre Caudebec-les-Elbeuf et Grand-Couronne et dans les vallées principales entre Mont-Saint-Aignan et Malaunay et entre Saint-Jacques-sur-Darnetal et Saint-Léger-du-Bourg-Denis.

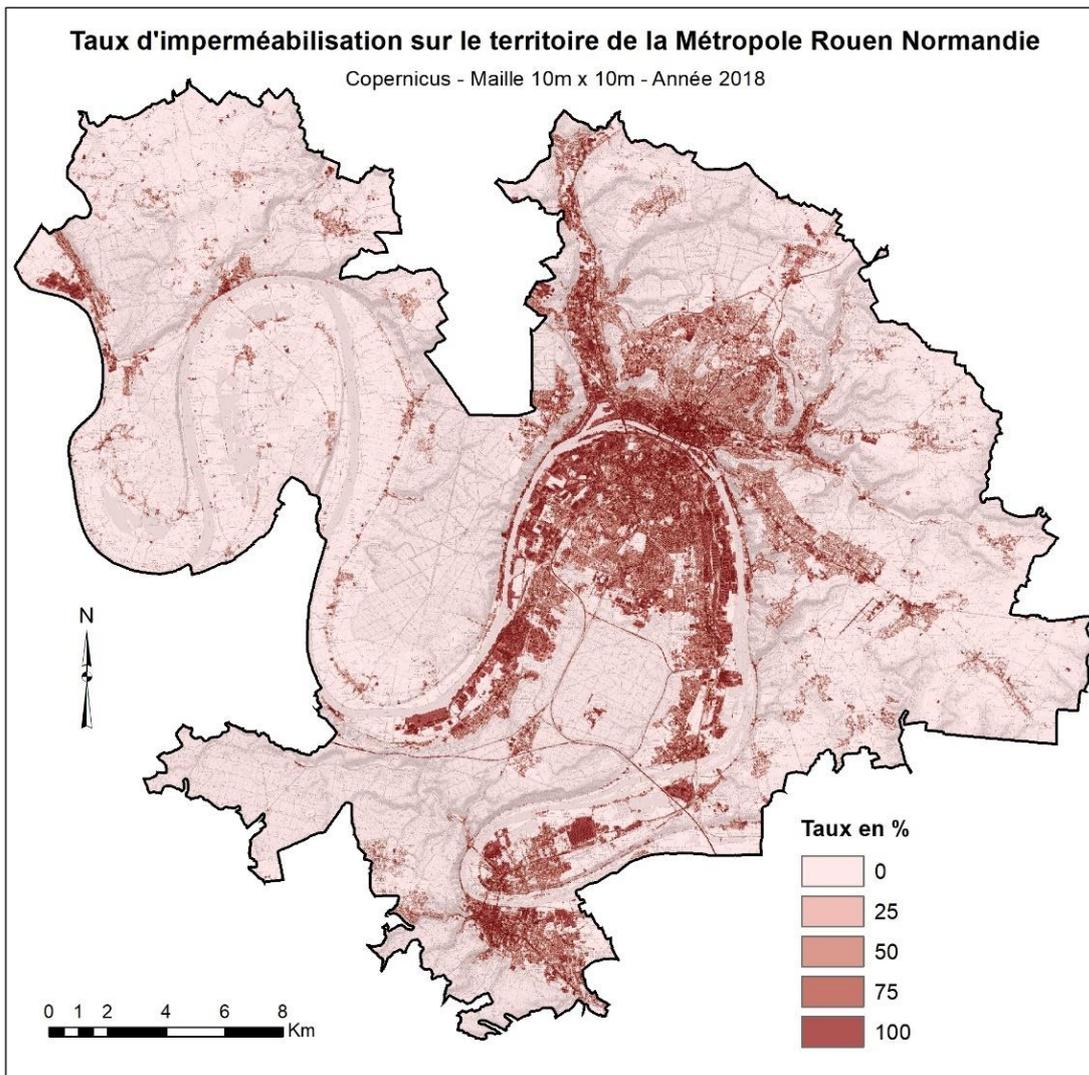


Fig. 133 : Carte du taux d'imperméabilisation des sols sur le territoire métropolitain

A l'échelle de la couche végétale urbaine, les surfaces caractérisées par une imperméabilisation importante (50-100%) sont minoritaires. Elles représentent un peu plus de 10% de la surface totale et couvrent une superficie de l'ordre de 1 000 ha (cf. Fig.134). Les secteurs pour lesquels l'imperméabilisation est faible (inférieure à 25%) sont majoritaires. Ce phénomène concerne un peu moins de 6 200 ha, soit les 2/3 de la surface de la couche végétale urbaine.

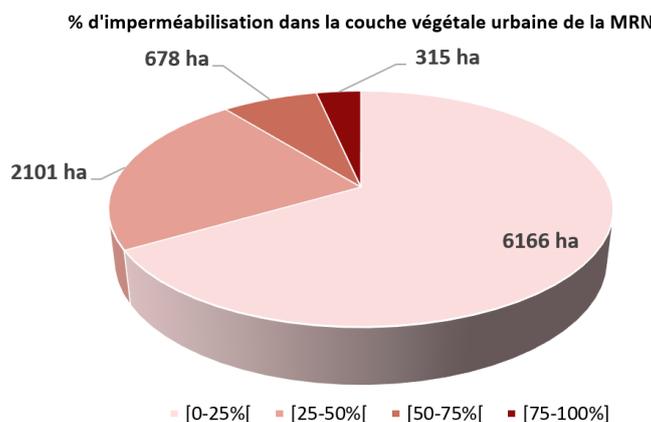


Fig. 134 : % d'imperméabilisation dans la couche végétale urbaine de la Métropole

### 4.3.2. La densité du couvert arboré sur le territoire de la MRN

L'organisation spatiale des surfaces où le % de couvert arboré dépasse 50% fait ressortir les grands boisements métropolitains en contexte de plateau et sur les milieux et hauts des versants de la vallée de la Seine (cf. Fig.135). On retrouve également des valeurs élevées de couverture arborée sur les ruptures de pente de rebord de plateau et sur les versants de la Seine à pente forte. Les faibles densités de couverture arborée sont étroitement associées au tissu urbain et aux espaces agricoles en position de plateau et de bas de versant et fond de vallée de la Seine.

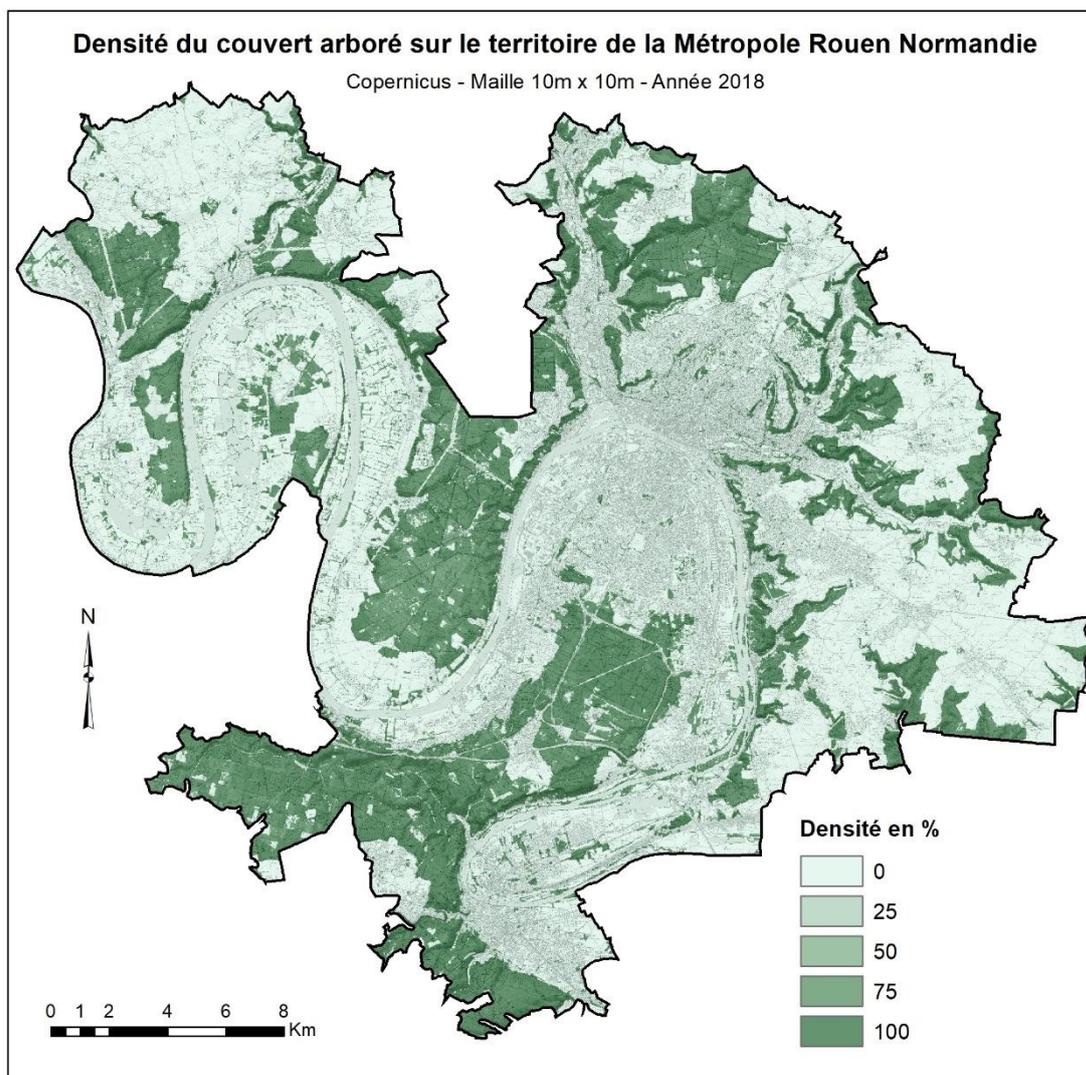


Fig. 135 : Carte de la densité du couvert arboré sur le territoire métropolitain

Sur les secteurs urbains, on note que la couche végétale urbaine est très largement représentée par des surfaces à faible densité de couverture arborée (0-25%). Elles couvrent 7 835 ha soit 85% de la superficie totale (cf. Fig.136). Toutefois, les espaces marqués par un couvert arboré supérieur ou égal à 50% des surfaces des mailles occupent une place qui n'en est pas pour autant marginale puisqu'ils s'étendent sur plus de 1 200 ha.

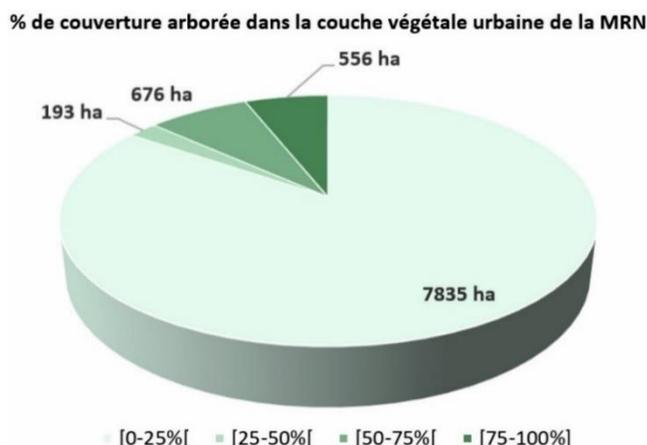


Fig. 136 : % de couverture arborée dans la couche végétale urbaine de la Métropole

#### 4.3.3. La capacité fonctionnelle des sols dans la couche végétale urbaine

Le traitement des couches Copernicus « Imperméabilisation » et « Densité du couvert arboré » permet de proposer une cartographie de la capacité fonctionnelle des sols au sein de la couche végétale urbaine. Les résultats présentés ci-dessous posent question concernant le principe même de la méthode MUSE dans ce type de contexte (cf. Fig.137). **En effet, la capacité fonctionnelle intermédiaire domine nettement les deux autres classes puisqu'elle couvre 75% de la superficie totale, contre 10% pour les espaces à capacité nulle et 15% pour ceux associés à une capacité optimale.** Dans ces conditions, il est difficile de s'appuyer sur ces données pour accompagner les réflexions en matière de projets urbains. C'est la raison pour laquelle nous avons procédé à titre exploratoire à une désagrégation de la classe « capacité intermédiaire » pour extraire les mailles à capacité fonctionnelle assez élevée.

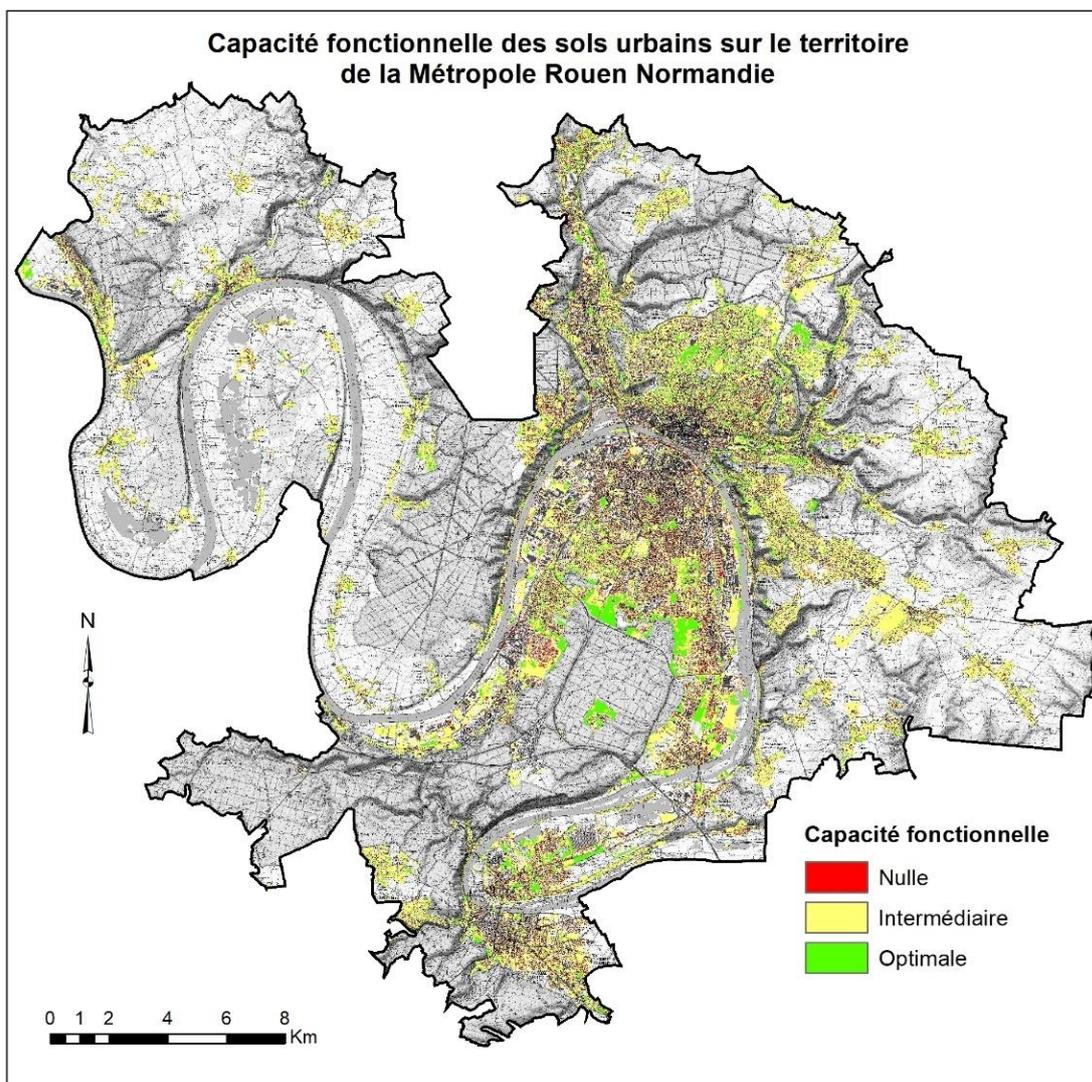


Fig. 137 : Carte de la capacité fonctionnelle des sols urbains dans la couche végétale urbaine de la Métropole

#### 4.3.4. Désagrégation de la classe « capacité intermédiaire » pour extraire les mailles à capacité fonctionnelle assez élevée

L'opération consiste à isoler les mailles répondant à la double condition suivante :

- le % de couvert arboré est inférieur à 49%
- le résultat de la soustraction entre une base 100 et le % d'imperméabilisation additionné au % de couvert arboré est supérieur ou égal à 50 (couche dénommée « Sols non imperméabilisés et non arborés »).

Les mailles caractérisées par cette double condition sont considérées comme ayant une capacité fonctionnelle assez élevée. Cette désagrégation aboutit à une requalification de 64% des mailles de la classe « Intermédiaire. La restitution cartographique présentée ci-dessous (cf. Fig.138) réunit les situations où la capacité fonctionnelle des sols dans la couche végétale urbaine est assez élevée et optimale. Elles couvrent près de 5 800 ha, ce qui représente un taux de couverture de la couche végétale urbaine de 62%, révélant de manière non négligeable une réelle capacité fonctionnelle des sols en milieu urbain.

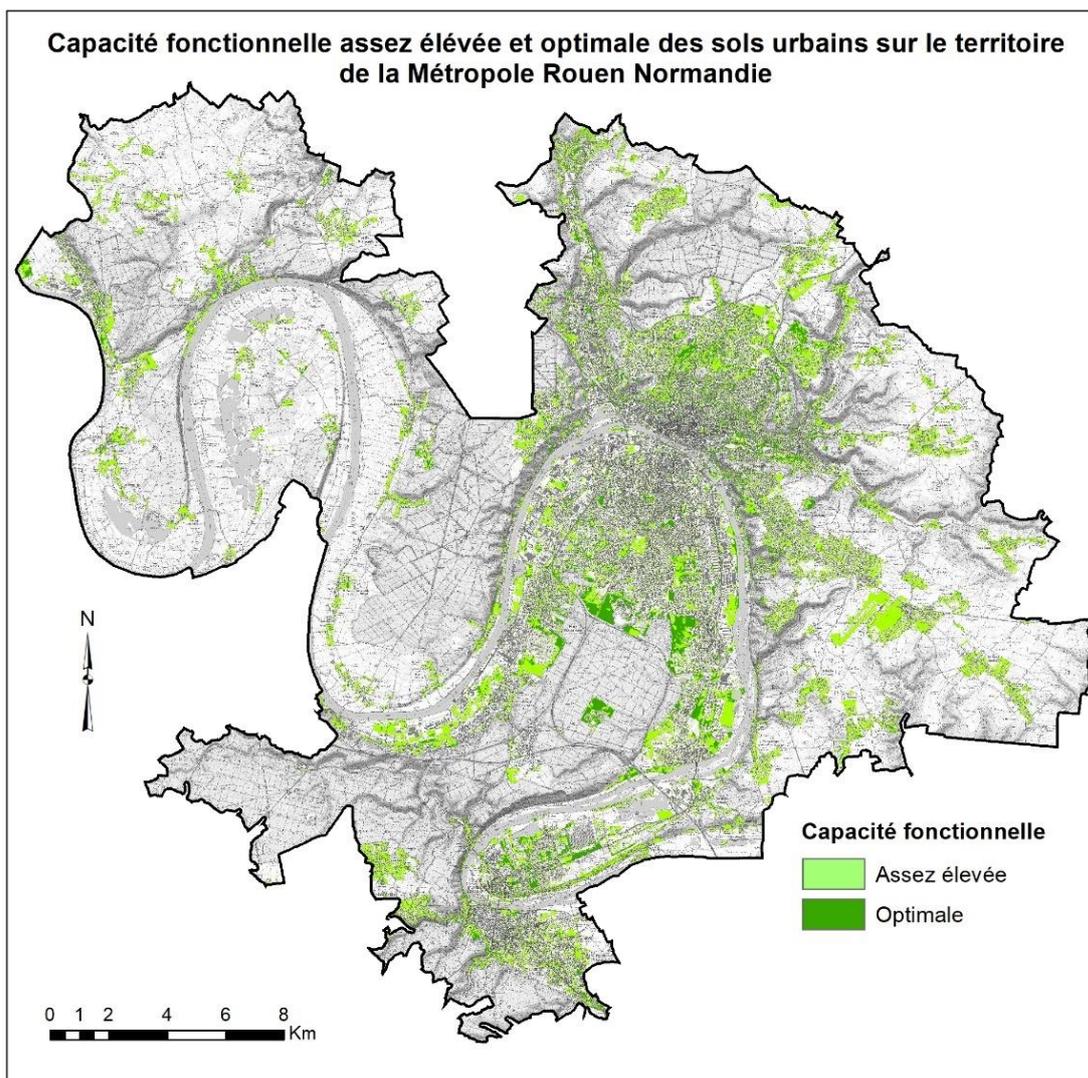


Fig. 138 : Carte de la capacité fonctionnelle assez élevée et optimale des sols urbains dans la couche végétale urbaine de la Métropole

Cette démarche exploratoire offre la perspective d'un accompagnement des pratiques d'urbanisme visant (1) le maintien ou le rétablissement de la continuité écologique des sols, (2) les opérations de renaturation en ville et (3) l'insertion d'une agriculture interstitielle. Ainsi, une analyse d'échelle fine des données précédentes permet de faire ressortir les secteurs favorables à la présence d'une continuité fonctionnelle des sols (cf. Fig.139) et donc à des opérations de restauration ou de préservation de la trame brune des territoires urbanisés.

### Exemple de continuité fonctionnelle des sols sur le territoire de la Métropole Rouen Normandie

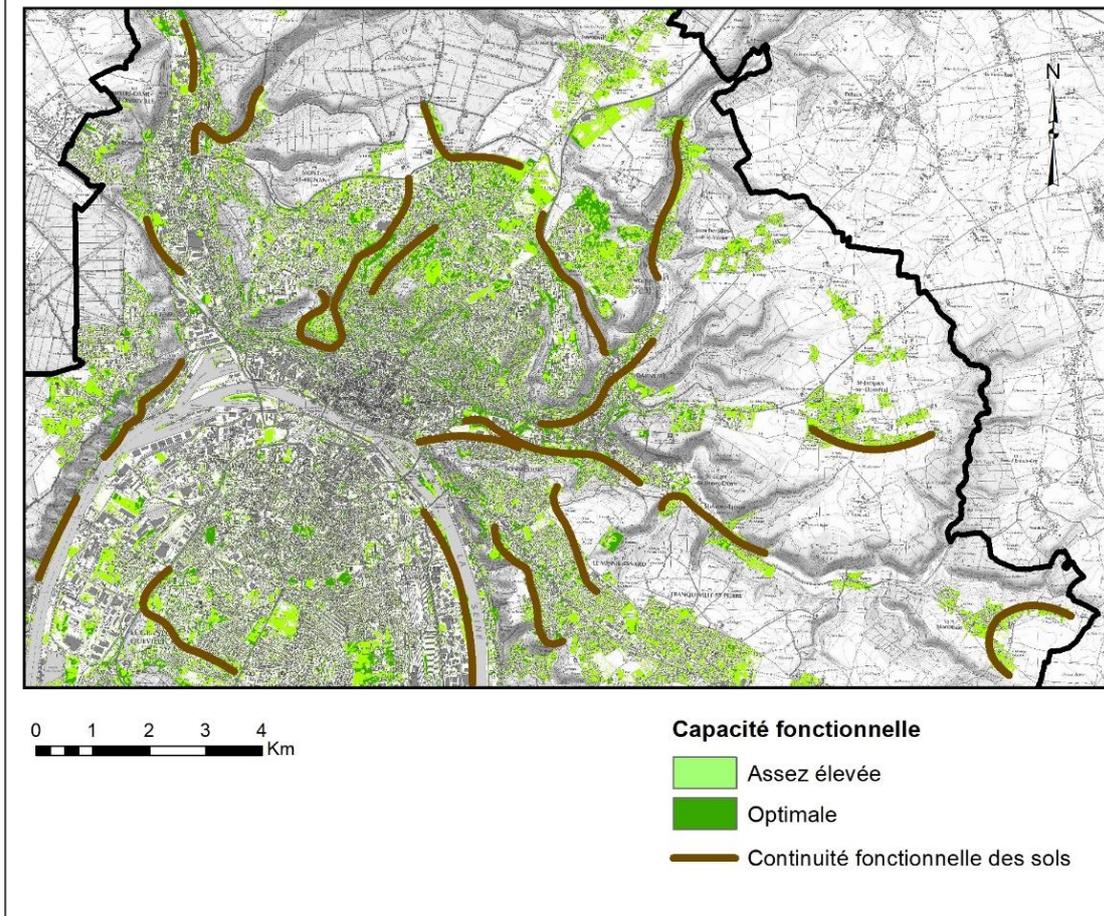


Fig. 139 : Exemple de continuité fonctionnelle des sols dans la couche végétale urbaine de la Métropole

# Analyse territoriale

L'analyse territoriale doit permettre d'apporter des éléments d'éclairage en réponse à des questions posées par la Métropole Rouen Normandie afin de l'accompagner dans la gestion durable des enjeux à court et moyen termes concernant plus particulièrement l'urbanisation, l'adaptation au changement climatique et la préservation des ressources naturelles et de la biodiversité. Rappelons que les zones NB et NA n'ont pas été retenues dans ce programme car elles sont déjà protégées dans le PLUi.

Les questions posées étaient les suivantes :

- Peut-on territorialiser la ceinture maraîchère avec les données du potentiel agronomique ? Y-a-t-il des secteurs plus propices au développement du maraichage ? Si oui lesquels ? Sont-ils situés sur des aires d'alimentation de captage prioritaires/sensibles ? Sur les secteurs vulnérables au regard des éléments de la stratégie foncière eau ?
- Y-a-t-il des secteurs plus propices au développement de l'élevage ou à son maintien ? sont-ils sur les secteurs identifiés vulnérables par la stratégie foncière eau ?
- Sur les secteurs vulnérables pour la ressource en eau, y-a-t-il des secteurs à fort potentiel agronomique ? Pour quel système de production ?
- Concernant les zones AU, ces secteurs ont-ils un bon potentiel agronomique ? Y-a-t-il des secteurs particulièrement riches à préserver de l'urbanisation pour préserver ce potentiel et donc l'activité agricole ?
- Concernant les zones UP/URP, ont-elles un bon potentiel agronomique malgré leur caractère anthropique ? Pourrait-on envisager le développement de l'agriculture urbaine si des projets devaient se développer sur ce type de zone ?
- Pour les secteurs les plus pauvres au niveau du potentiel agronomique, peut-on identifier des secteurs ? Sont-ils en lien avec les milieux calcicoles et silicicoles connus ? Y-a-t-il de l'agriculture sur ces secteurs ? Quel type de production ? Faut-il les préserver par un zonage adapté ? Sont-ils sur des zones vulnérables pour la ressource en eau ?
- Le potentiel agronomique des sols est-il susceptible d'évoluer au regard des effets du changement climatique (lien avec agriclim scénario RPC 4.5 GIEC) ?

## 1. Les enjeux en lien avec les potentialités agronomiques

Dans cette partie, les questions de la Métropole concernent les orientations de production, la qualité agronomique des sols et leurs liens avec les aires d'alimentation de captage, les secteurs vulnérables au regard de la stratégie foncière eau, les zones de développement et de renouvellement urbain, les réservoirs écologiques et le changement climatique.

## 1.1. Les conditions de développement du maraîchage et leur impact sur la ressource en eau

La représentation spatiale des potentialités agronomiques en système maraîcher a permis de montrer que la moitié de la surface agricole du territoire métropolitain est caractérisée par un potentiel élevé. Le potentiel de développement de grands ensembles favorables au maraîchage se dessine autour d'une ceinture maraîchère métropolitaine composée de trois sous-ensembles selon un axe compris entre Epinay-sur-Duclair et Les Authieux-sur-le-Port-Saint-Ouen (cf. Fig.140).

Le premier sous-ensemble s'étend d'Epinay-sur-Duclair jusqu'à Hénouville en passant par Saint-Pierre-de-Varengeville. Le second débute à Isneauville et se prolonge vers Saint-Léger-du-Bourg-Denis. Enfin, le troisième sous-ensemble réunit les communes de La Neuville-Chant-d'Oisel, Boos, Saint-Aubin-Celloville, les Authieux-le-Port-Saint-Ouen.

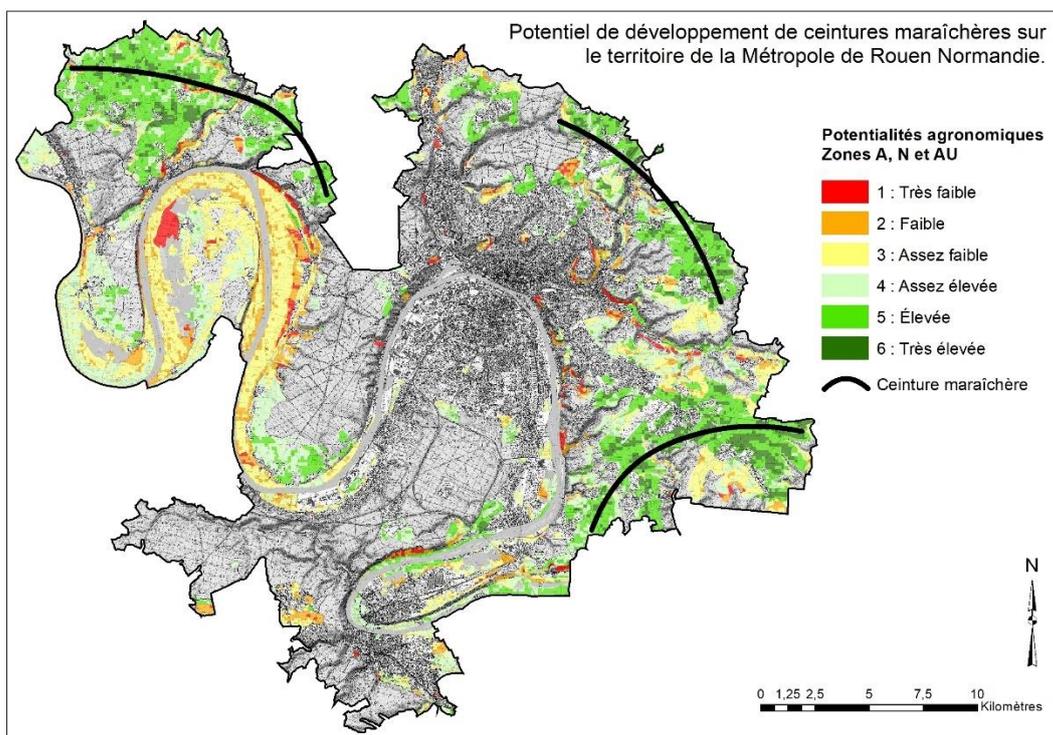


Fig. 140 : Carte du potentiel de développement de ceintures maraîchères sur le territoire métropolitain

Dans ces trois secteurs potentiels, certaines zones apparaissent plus propices encore à l'implantation de cultures maraîchères (cf. Fig.141). Il s'agit tout d'abord de la partie sud de Saint-Paër. Ce secteur est situé sur l'aire d'alimentation de captage de Duclair qui n'est pas classée prioritaire ou sensible. Le deuxième secteur à fort potentiel maraîcher concerne la partie nord-est de la commune de Saint-Jacques-sur-Darnetal. Il s'inscrit dans deux aires d'alimentation de captage : celle de Saint-Aubin-Epinay à l'est et celle des sources de Carville à Darnetal à l'Ouest. La seconde AAC est classée comme sensible. Enfin, nous avons relevé un troisième secteur favorable au maraîchage. Il est localisé à l'est du territoire de La Neuville-Chant-d'Oisel et recouvre partiellement l'AAC de l'Andelle qui n'est pas classée sensible ou prioritaire.

On note que ces trois secteurs ne recoupent pas les secteurs vulnérables au regard des éléments de la stratégie foncière eau.

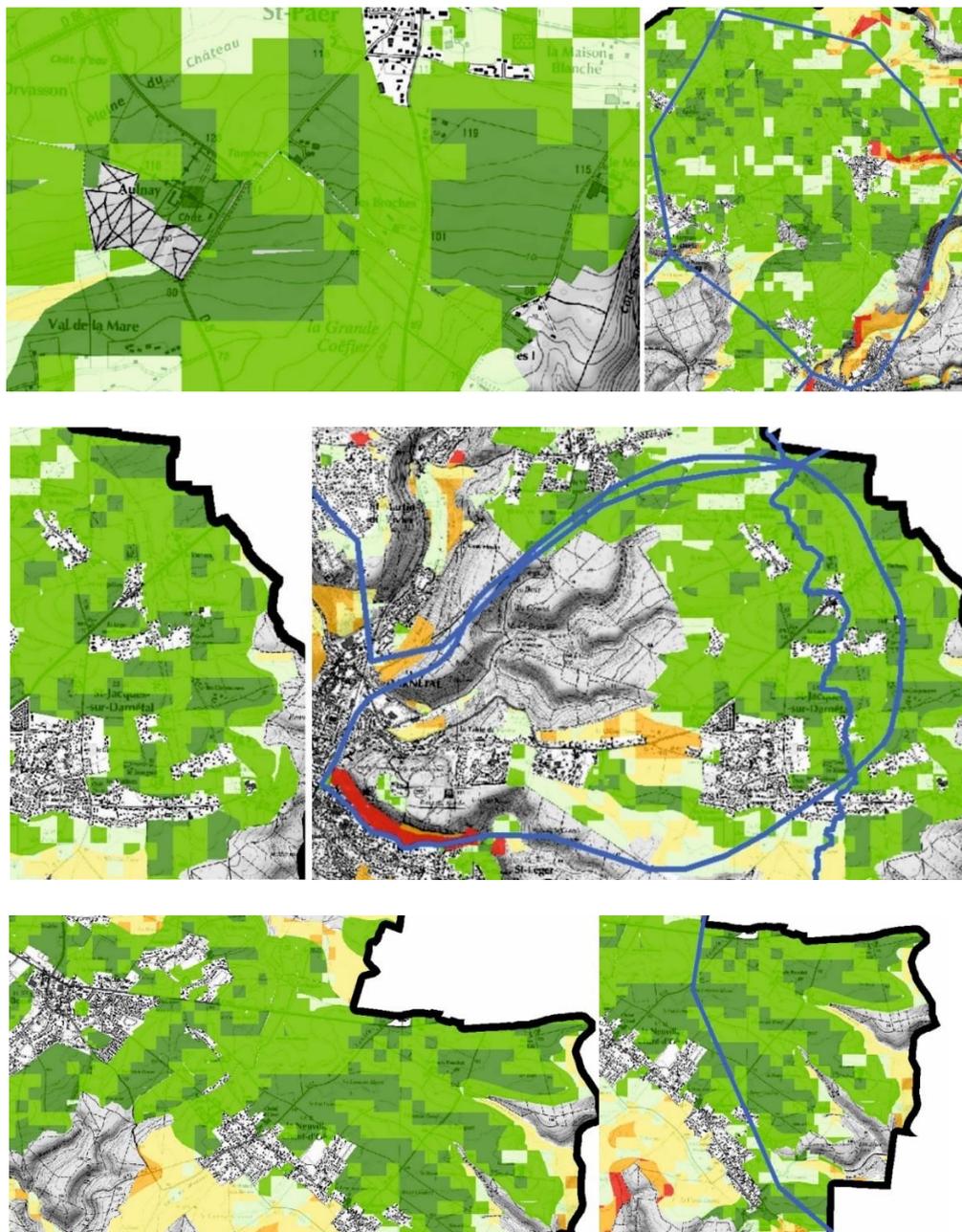


Fig. 141 : Secteurs propices à l'implantation d'une ceinture maraîchère

## 1.2. Les zones de développement ou du maintien de l'élevage et leur lien avec les secteurs identifiés comme vulnérables par la stratégie foncière eau

Sur l'ensemble des zones A, N et AU, près de 8 000 ha sont caractérisés par un bon potentiel agronomique pour l'élevage. Ils se concentrent autour de 4 secteurs formant des unités assez homogènes (cf. Fig.142). Il s'agit des secteurs de Saint-Paër (cf. Fig.143), de la basse vallée de la Seine entre Sahurs et Jumièges (cf. Fig.144), de Saint-Jacques-sur-Darnétal/Saint-Léger-du-Bourg-Denis (cf. Fig.145) et de la Neuville-Chant-d'Oisel (cf. Fig.146). Seul le troisième secteur (Saint-Jacques-sur-Darnétal/Saint-Léger-du-Bourg-Denis) est situé très partiellement sur une zone identifiée comme très vulnérable par la stratégie foncière eau.

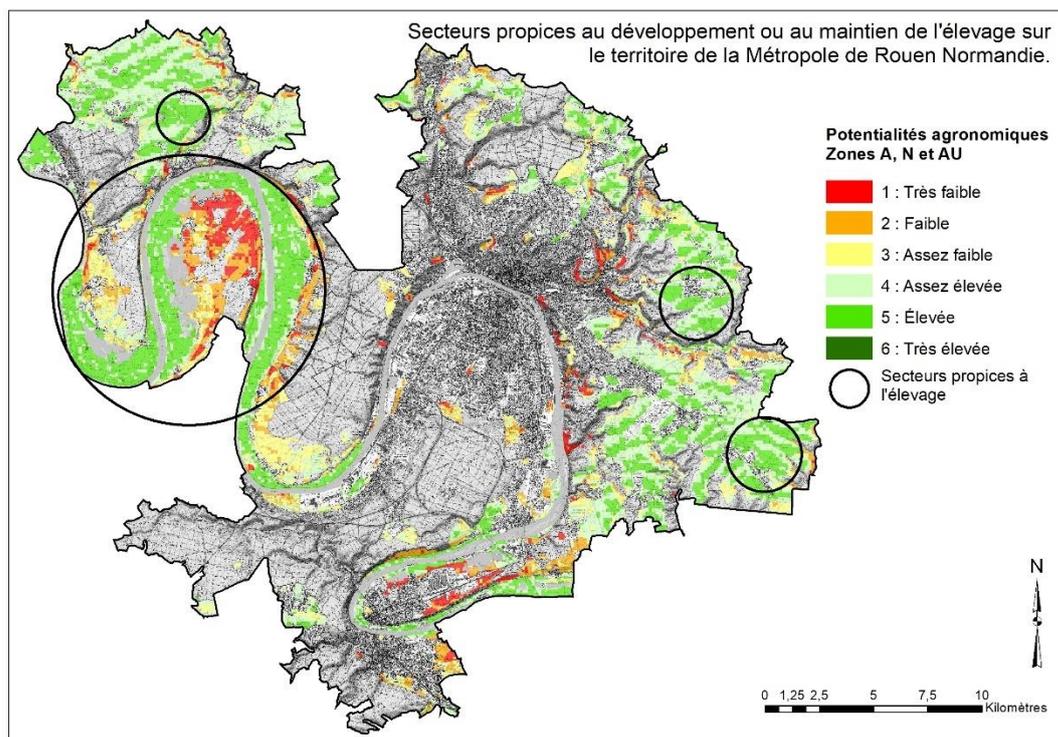


Fig. 142 : Secteurs propices au développement ou au maintien de l'élevage sur la Métropole



Fig. 143 : Secteur de Saint-Paër propice au développement ou au maintien de l'élevage sur la Métropole

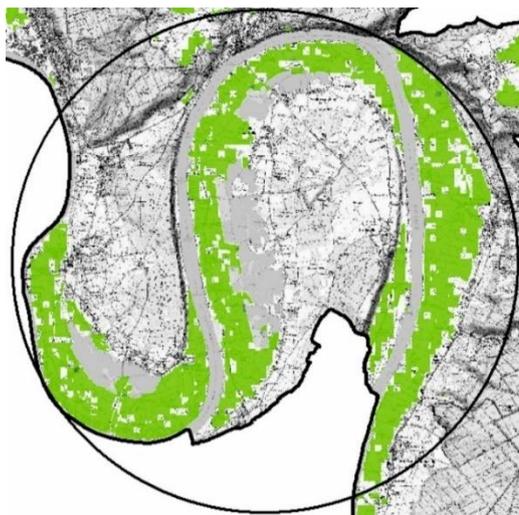


Fig. 144 : Secteur de la basse vallée de la Seine entre Sahurs et Jumièges propice au développement ou au maintien de l'élevage sur la Métropole



Vulnérabilité/stratégie foncière eau

- Faible
- Moyenne
- Forte

Fig. 145 : Secteur de Saint-Jacques-sur-Darnetal/Saint-Léger-du-Bourg-Denis propice au développement ou au maintien de l'élevage sur la Métropole

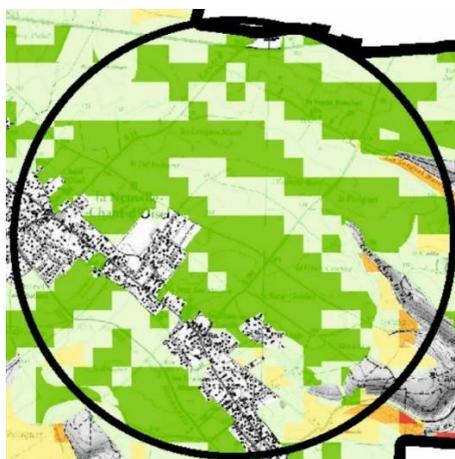


Fig. 146 : Secteur de la Neuville-Chant-d'Oisel propice au développement ou au maintien de l'élevage sur la Métropole

### 1.3. Vulnérabilité de la ressource en eau et potentiel agronomique élevé dans les trois systèmes de production agricole.

Pour chaque système de production agricole, nous avons extrait les secteurs à potentiel agronomique élevé et les zones de vulnérabilité faible, modérée et forte selon les éléments de la stratégie foncière eau. Ces cartes globales ont permis de faire ressortir les territoires qui réunissent à la fois des forts potentiels et une vulnérabilité de l'eau importante (cf. Fig.147). En système conventionnel, l'approche à l'échelle de la métropole montre que les recouvrements se limitent à quelques secteurs (cf. Fig.148) :

- au nord de Duclair, en position de rebord de plateau
- à Fontaine-sous-Préaux, en position de fond de vallée
- à l'est d'Épinay en remontant la vallée
- à l'ouest de Oissel, au lit-dit la Perreuse

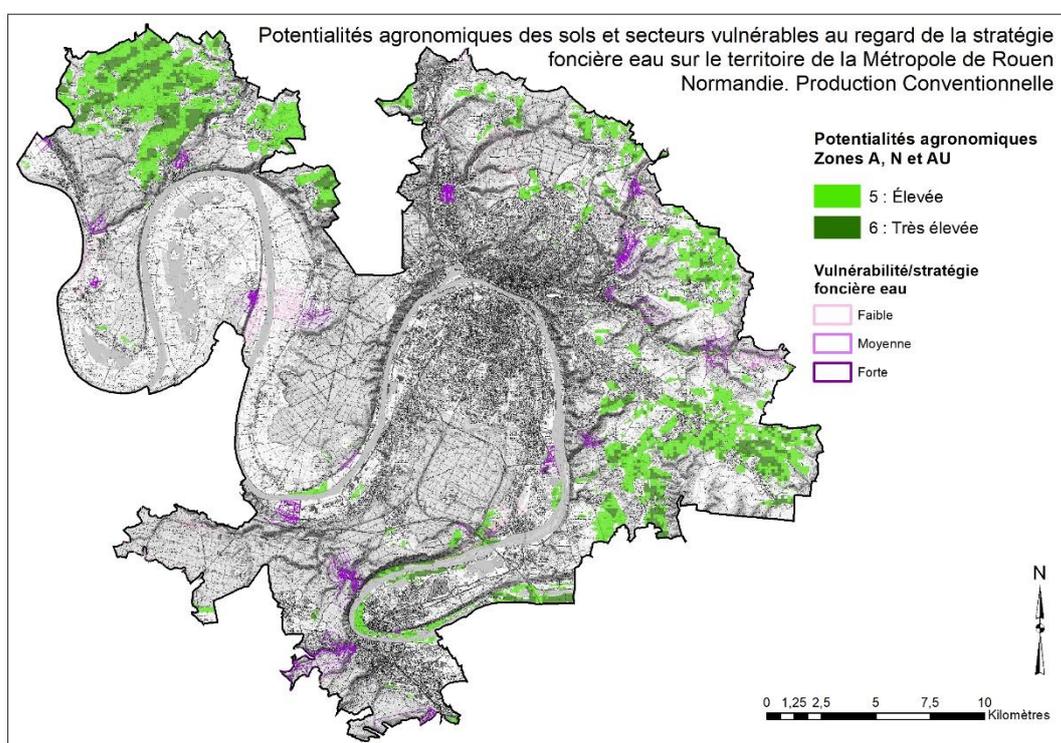
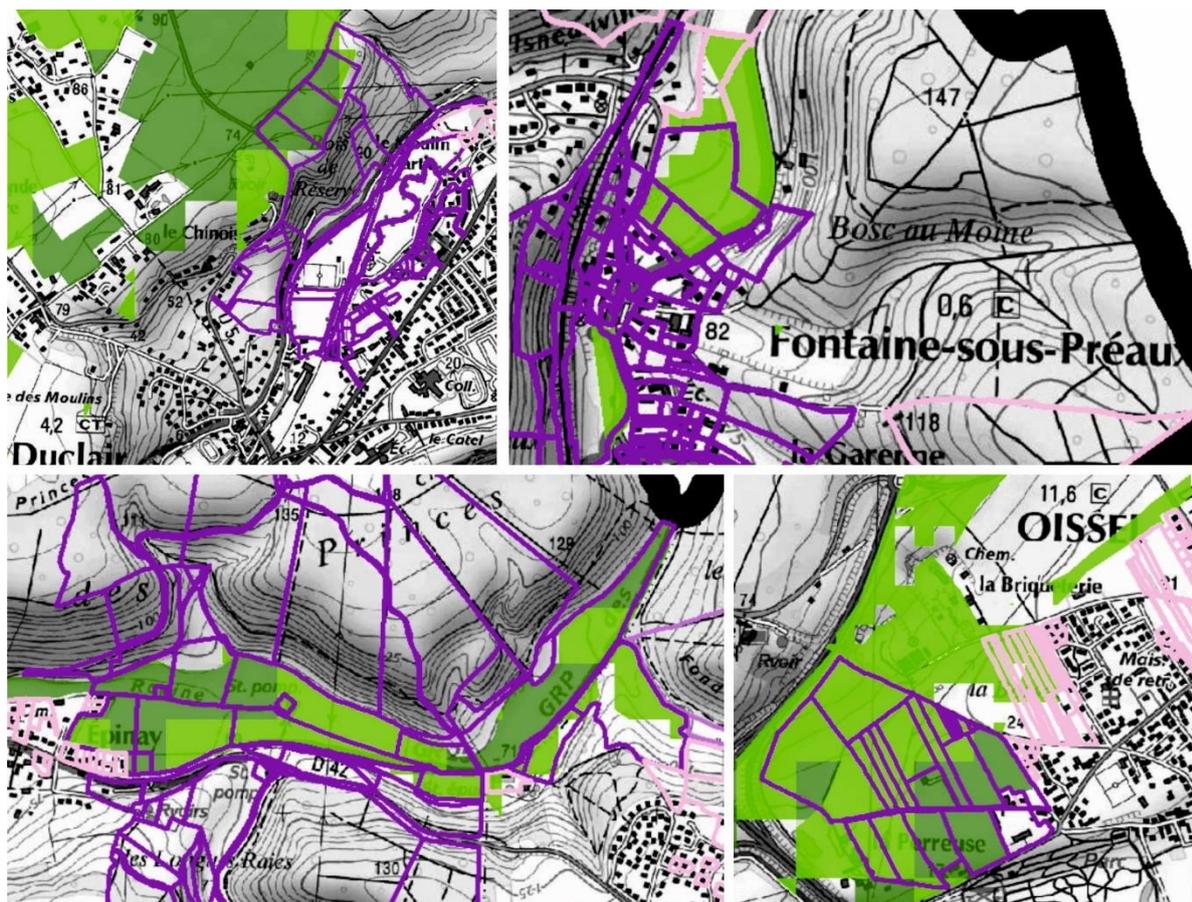


Fig. 147 : Carte des bonnes potentialités agronomiques en système conventionnel et des vulnérabilités de la ressource en eau selon la stratégie foncière eau



Potentialités agronomiques (zones A, N et AU)  
Système conventionnel

Élevée  
Très élevée

Vulnérabilité/ stratégie foncière Eau

Faible  
Moyenne  
Forte

Fig. 148 : Secteurs de recouvrement entre bonnes potentialités agronomiques et vulnérabilités de la ressource en eau selon la stratégie foncière eau

En contexte de production maraîchère (cf. Fig.149), les situations de recouvrement entre potentiel agronomique élevé et vulnérabilité importante de l'eau sont identifiées dans trois secteurs des quatre secteurs précédemment cités (cf. Fig.150) :

- à Fontaine-sous-Préaux, en position de fond de vallée
- à l'est d'Epinay en remontant la vallée
- à l'ouest de Oissel, au lit-dit la Perreuse

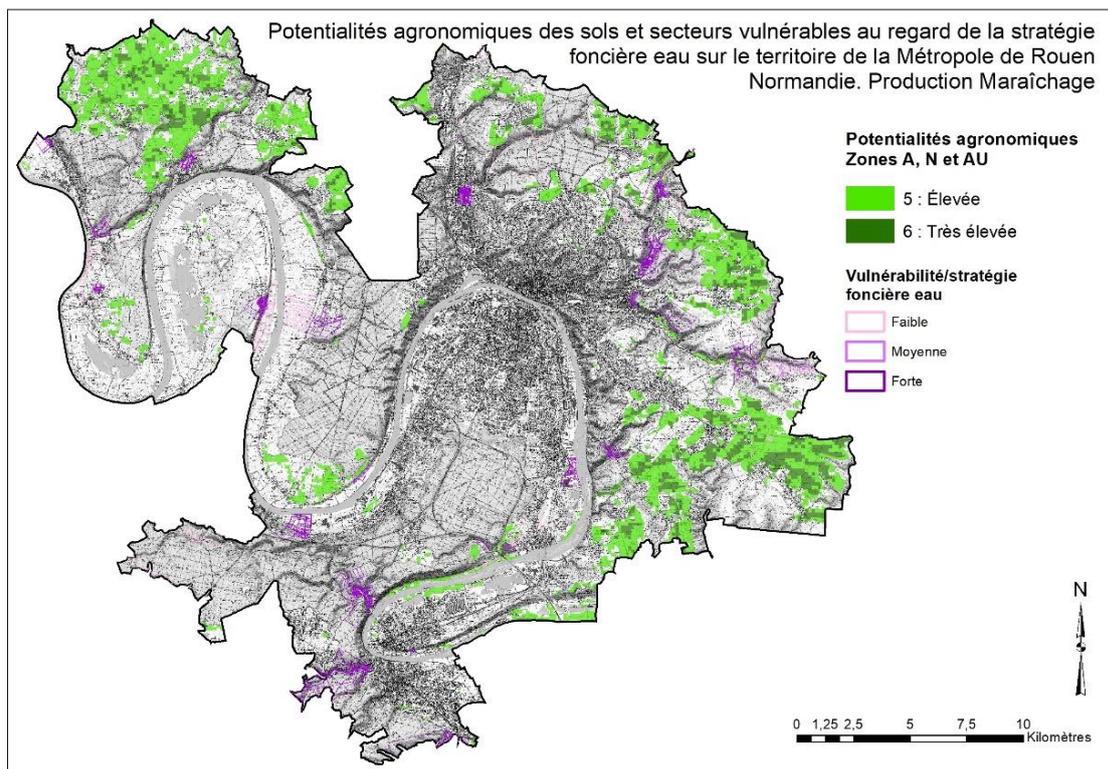


Fig. 149 : Carte des bonnes potentialités agronomiques en système maraîchage et des vulnérabilités de la ressource en eau selon la stratégie foncière eau

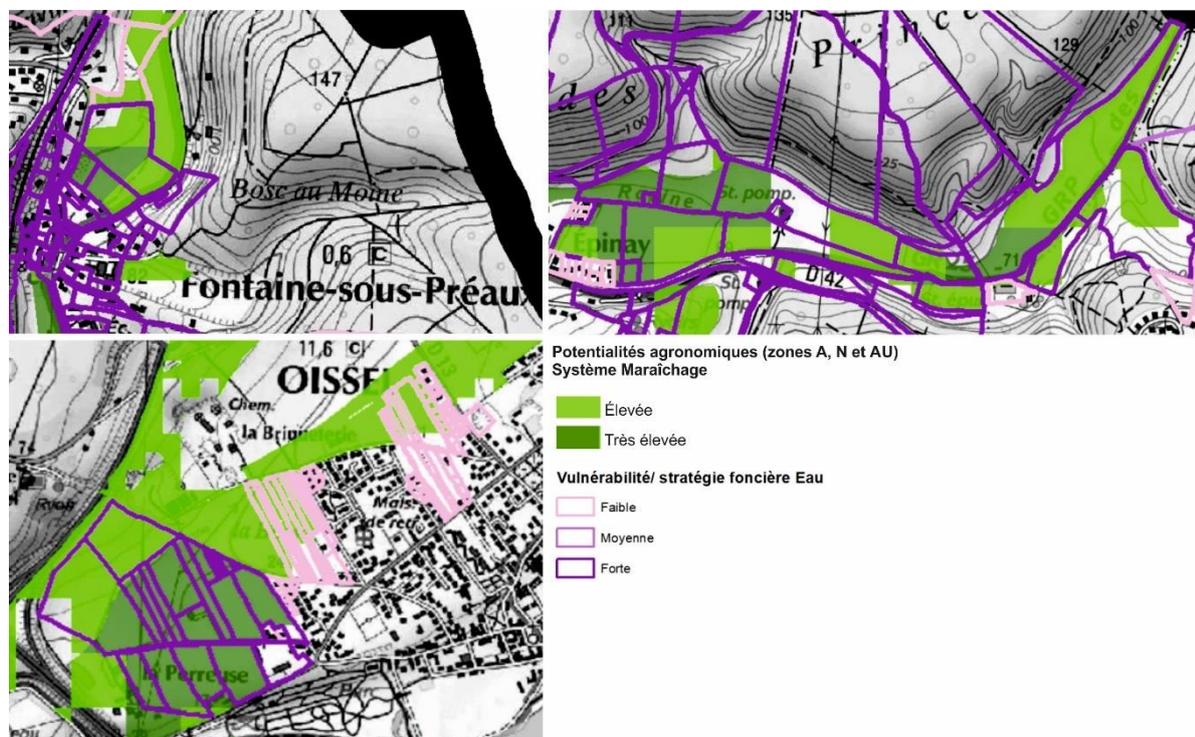


Fig. 150 : Secteurs de recouvrement entre bonnes potentialités agronomiques en système maraîchage et vulnérabilités de la ressource en eau selon la stratégie foncière eau

En situation d'élevage (cf. Fig.151), cette configuration de recouvrement concerne 4 secteurs (cf. Fig.152) :

- au nord-ouest de Le Trait, en basse vallée de la Seine
- au nord de Duclair, en position de rebord de plateau
- à l'est d'Épinay en remontant la vallée
- à l'ouest de Oissel, au lit-dit la Perreuse

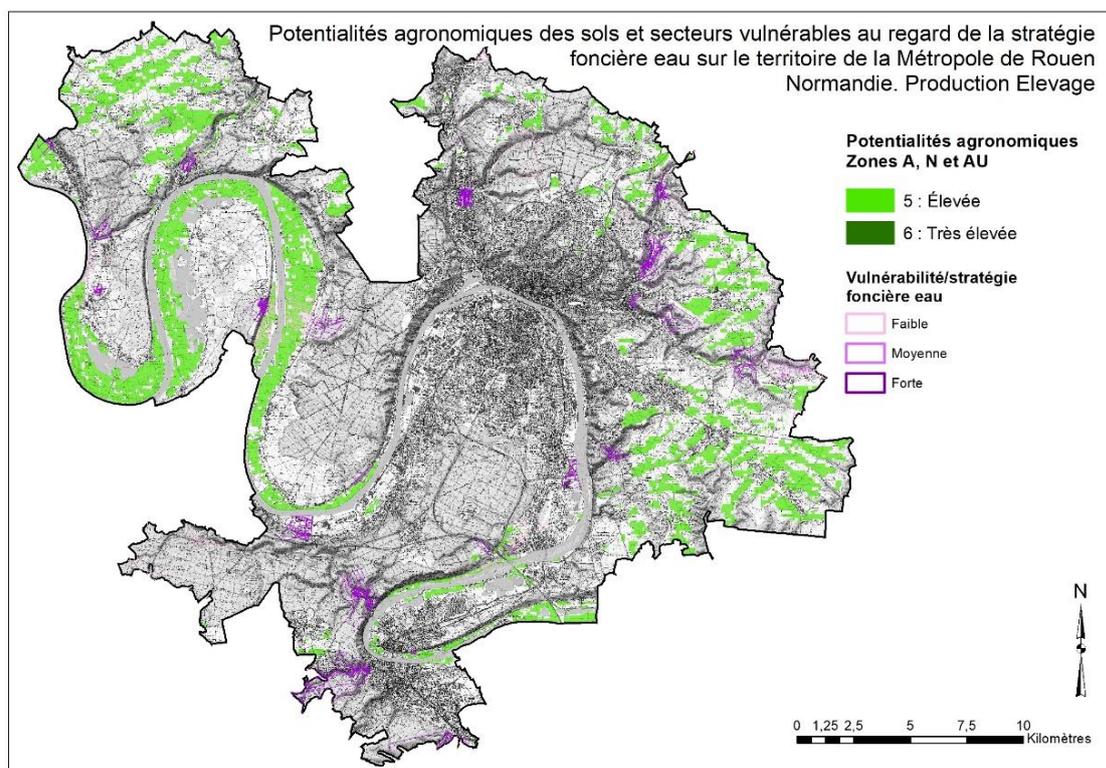


Fig. 151 : Carte des bonnes potentialités agronomiques en système élevage et des vulnérabilités de la ressource en eau selon la stratégie foncière eau

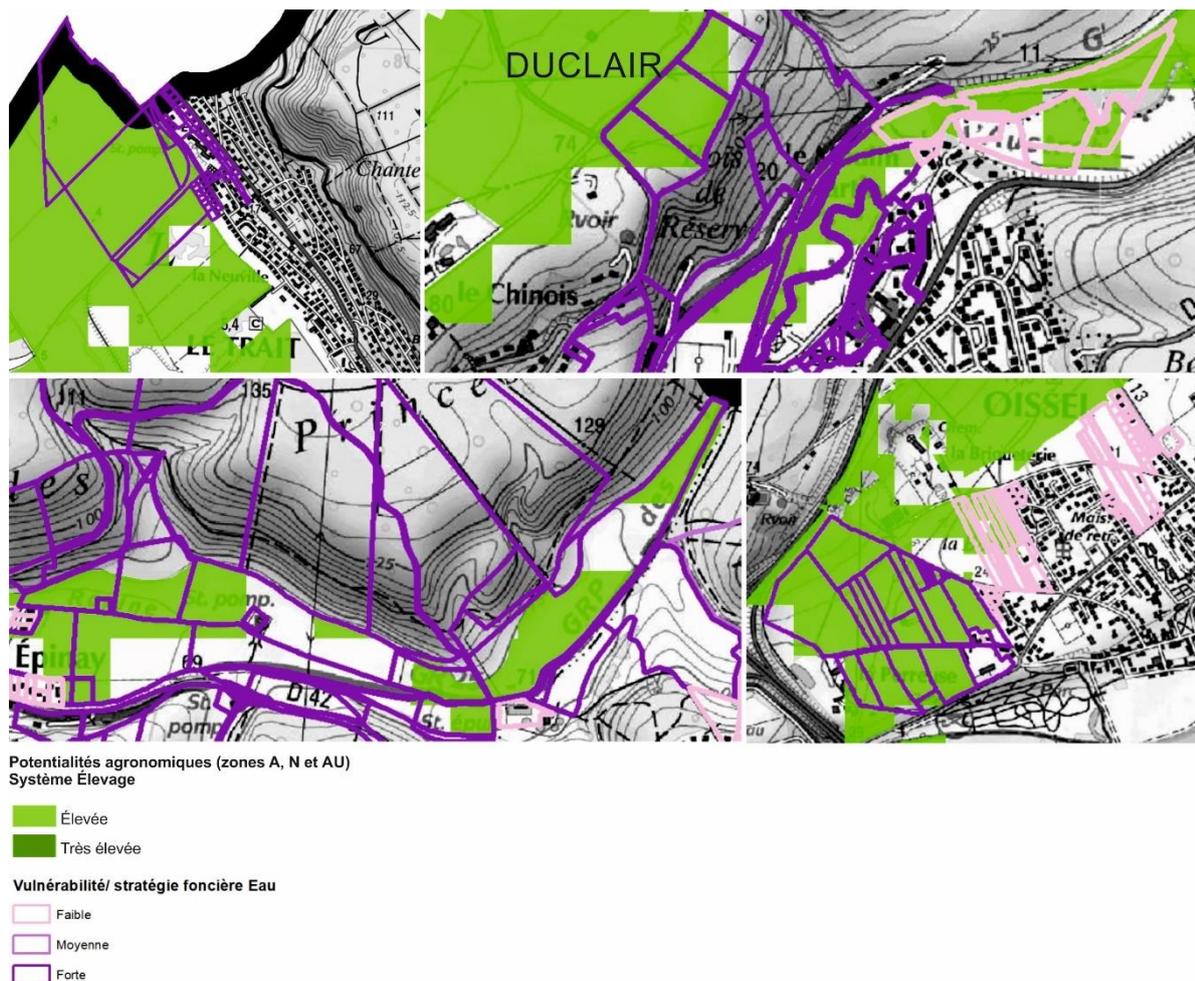


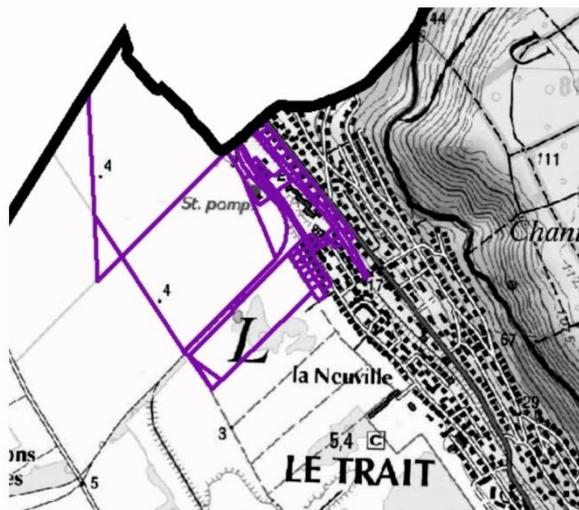
Fig. 152 : Secteurs de recouvrement entre bonnes potentialités agronomiques en système élevage et vulnérabilités de la ressource en eau selon la stratégie foncière eau

Lorsque l'on compare les potentialités agronomiques les plus élevées en système élevage et en système conventionnel pour les deux secteurs situés sur les communes de Le Trait et de Oissel (cf. Fig.153), on note pour la première commune que le potentiel en système conventionnel n'est pas classé en élevé ou très élevé alors qu'il le devient en système élevage. Dans le cas de Oissel, le potentiel agronomique demeure élevé pour les deux systèmes envisagés. Ces deux exemples montrent qu'il est très intéressant de remplacer du conventionnel par de l'élevage en implantant de la prairie sur des sols qui s'y prêtent afin de réduire la pression sur la ressource en eau.

Potentialités agronomiques (zones A, N et AU)  
Système Élevage



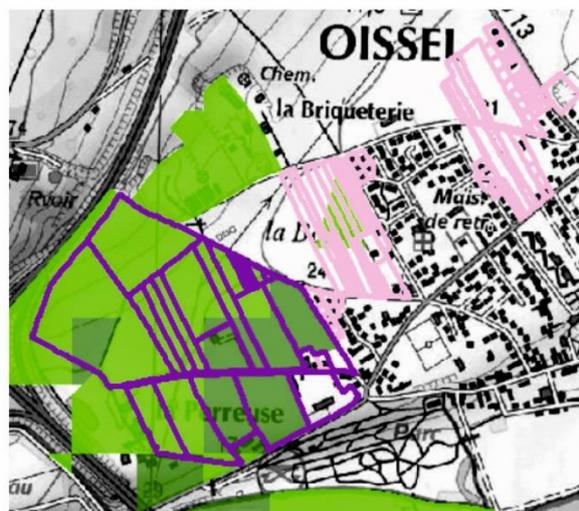
Potentialités agronomiques (zones A, N et AU)  
Système Conventionnel



Potentialités agronomiques (zones A, N et AU)  
Système Élevage



Potentialités agronomiques (zones A, N et AU)  
Système Conventionnel



Vulnérabilité/ stratégie foncière Eau



Fig. 153 : Comparaison des potentialités agronomiques en système élevage et système conventionne pour deux secteurs situés sur les communes de Le Trait et de Oissei

### 1.4. La préservation des terres agricoles à fort potentiel agronomique en zone AU

Les données obtenues à partir du modèle SQUAT ont montré que les zones AU attestent de surfaces non négligeables à potentiel agronomique élevé et très élevé. Elles représentent 117 ha en système conventionnel et 191 ha pour une orientation maraîchère, soit respectivement 17% et 28% de toutes les surfaces en zone AU.

Compte tenu de contexte souvent intra-urbain des secteurs ouverts à l'urbanisation, nous avons fait le choix d'identifier uniquement les zones AU pour lesquelles le potentiel agronomique en système conventionnel et maraîcher est particulièrement intéressant dans une démarche de préservation des bonnes terres agricoles pour maintenir l'activité agricole ou pour développer différentes formes d'agriculture urbaine (agriculture interstitielle, jardins collectifs, micro-fermes, fermes urbaines, fermes maraîchères périurbanisées).

Dans le cas d'une agriculture conventionnelle, 9 secteurs en zone AU présentent des très bons potentiels agronomiques (cf. Fig.154). Ils sont répertoriés ci-dessous et concernent les communes de Bois-Guillaume, Boos, Duclair, Epinay-sur-Duclair, Franqueville-Saint-Pierre, Sainte-Marguerite-sur-Duclair, Saint-Paër, Saint Pierre-de-Varengeville et Ymare.



Fig. 154 : Secteurs en zone AU à bonnes potentialités agronomiques en système conventionnel

Pour une orientation agricole tournée vers le maraîchage, nous avons identifié 9 secteurs en zone AU aux sols à fort potentiel agronomique (cf. Fig.155). Ils sont répertoriés également ci-dessous et concernent les communes de Bois-Guillaume, Boos, Duclair, Epinay-sur-Duclair, Hautot-sur-Seine, La Neuville-Chant-d'Oisel, Le Mesnil-sous-Jumièges, Oissel et Saint-Jacques-sur-Darnetal.

Dans le cas de Bois-Guillaume, Boos, Duclair, Epinay-sur-Duclair, les potentiels agronomiques renvoient à de très bonnes terres agricoles tant en système conventionnel qu'en système maraîcher. Ces secteurs méritent donc une attention plus particulière en matière de protection des terres agricoles susceptibles de bénéficier à différentes formes d'agriculture.



Fig. 155 : Secteurs en zone AU à bonnes potentialités agronomiques en système maraîchage

### 1.5. Quel potentiel de développement d’une agriculture urbaine en zones UP et URP ?

Les documents ci-dessous montrent que, quel que soit le système de production envisagé, les potentiels agronomiques des 11 sites tests de la métropole sont globalement peu favorables à l’implantation d’une agriculture urbaine (cf. Fig.156 et 157). Cependant, les sols à potentiel agronomique assez élevé pour des productions maraîchères couvrent tout de même 50% de la superficie des zones étudiées. La cartographie des potentiels agronomiques en système maraîchage révèle une vraie aptitude aux cultures maraîchères pour les 3 UP de Jumièges, Elbeuf et Bihorel et pour les URP 14 et 32 d’Elbeuf et de Canteleu (cf. Fig.158).

**Zones UP/URP**

Valeurs	Qualificatifs	SQUAT_C		SQUAT_M		SQUAT_E	
		Ha	%	Ha	%	Ha	%
1	Très faible	0	0,0	0	0,0	27	19,3
2	Faible	33	23,7	5	3,5	53	38,6
3	Assez faible	70	51,3	59	42,6	33	23,9
4	Assez élevée	28	20,4	69	50,5	18	12,9
5	Élevée	6	4,5	5	3,3	7	5,3
6	Très élevée	0	0,1	0	0,0	0	0,0
		<b>137</b>	<b>100</b>	<b>137</b>	<b>100</b>	<b>137</b>	<b>100</b>

Fig. 156 : Potentialités agronomiques en zones UP et URP selon les 3 systèmes de production Conventionnel, Maraîchage et Élevage



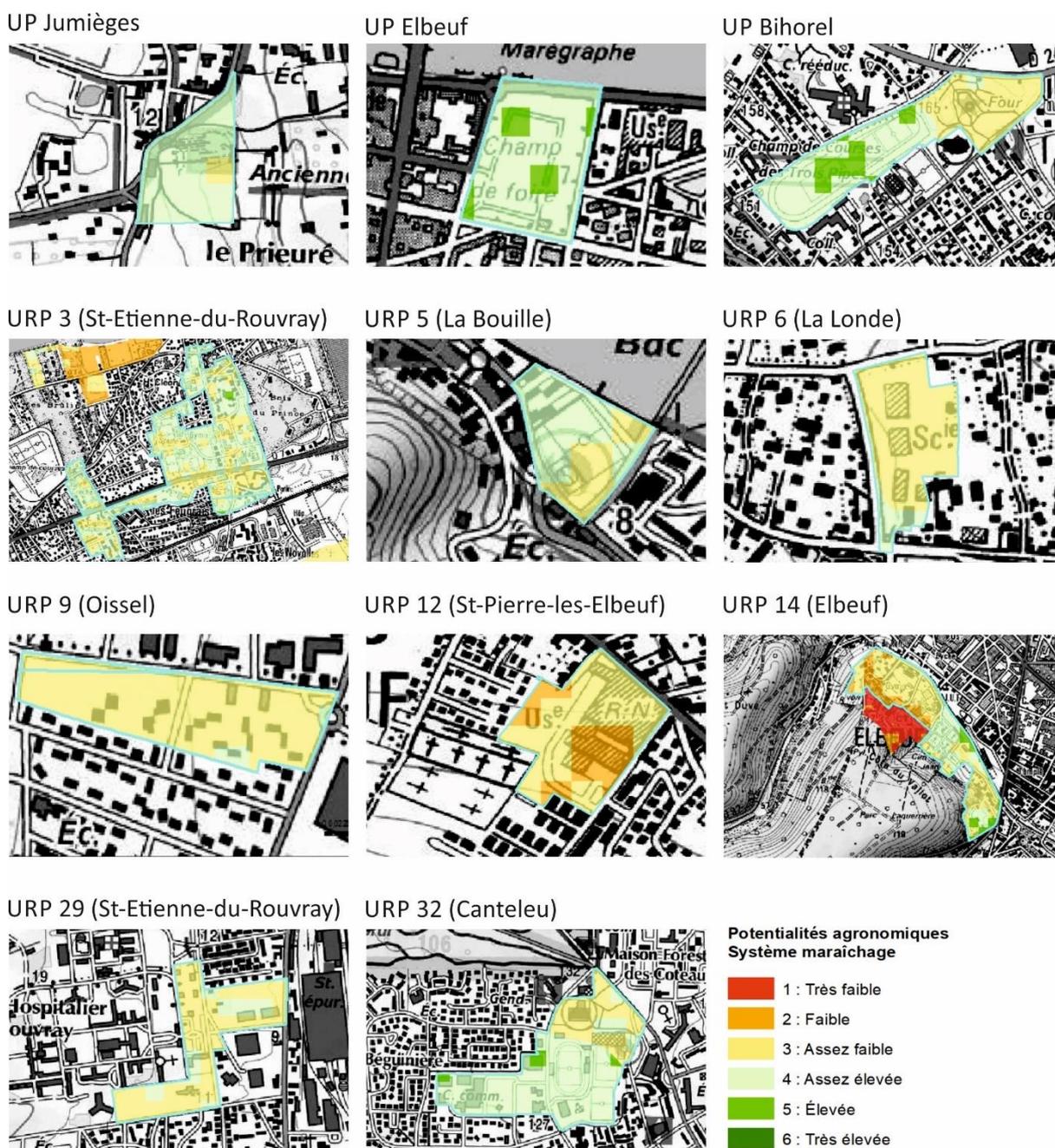


Fig. 158 : Potentialités agronomiques en système maraîchage pour les sites UP et URP

## 1.6. Contexte et enjeux pour les sols à faible potentiel agricole.

Pour les 3 systèmes de production envisagés, les secteurs caractérisés par les potentialités agronomiques les plus faibles (notes 1 et 2 du modèle SQUAT) représentent environ 15% des surfaces toutes zones confondues. La carte ci-dessous permet de localiser ces surfaces à faible potentiel (cf. Fig.159).

On les retrouve d'une part sur les bas de versants et les versants abrupts de la vallée de la Seine, sur les communes de Anneville-Ambourville, Bardouville, d'Hérouville, Saint-Martin-de-Boscherville, Quevillon, Belbeuf, Amfreville-la-Mi-Voie, Sotteville-sous-le-Val et Freneuse (ellipses 1, 2 et 3 sur la carte). Elles sont associées d'autre part aux ruptures de pente de rebord de plateau que l'on peut observer fréquemment sur les communes de Montmain, Franqueville-Saint-Pierre, Darnetal et Saint-

Léger-du-Bourg-Denis (ellipses 4 et 5). Les sols sont pauvres agronomiquement en raison de leur faible épaisseur, d'un déficit hydrique important, d'une charge caillouteuse abondante et d'une topographie contraignante pour les travaux agricoles des sols.

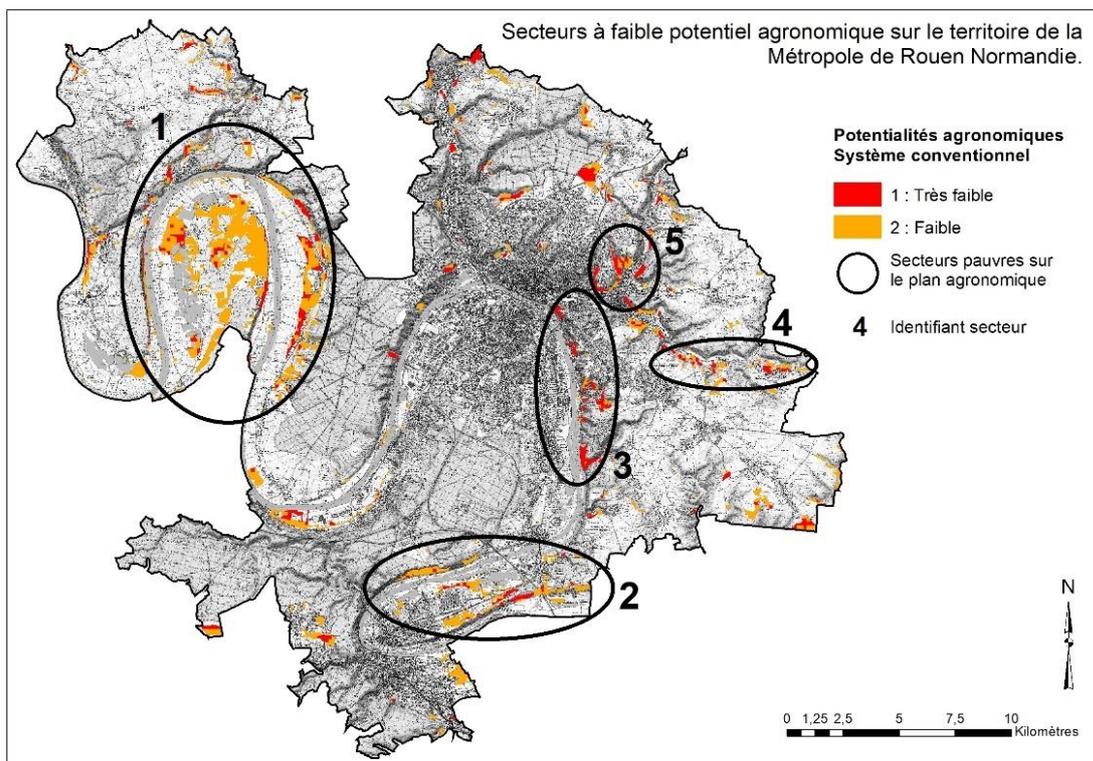


Fig. 159 : Secteurs à faibles potentialités agronomiques en système conventionnel sur le territoire métropolitain

Les illustrations ci-dessous montrent que ces 5 secteurs sont valorisés par l'agriculture (parcellaire agricole délimité par des contours verts) à des degrés différents (cf. Fig.160). Le secteur 4 est entièrement un secteur agricole, les secteurs 1, 2 et 5 le sont partiellement et le secteur 3 relève intégralement des espaces naturels.

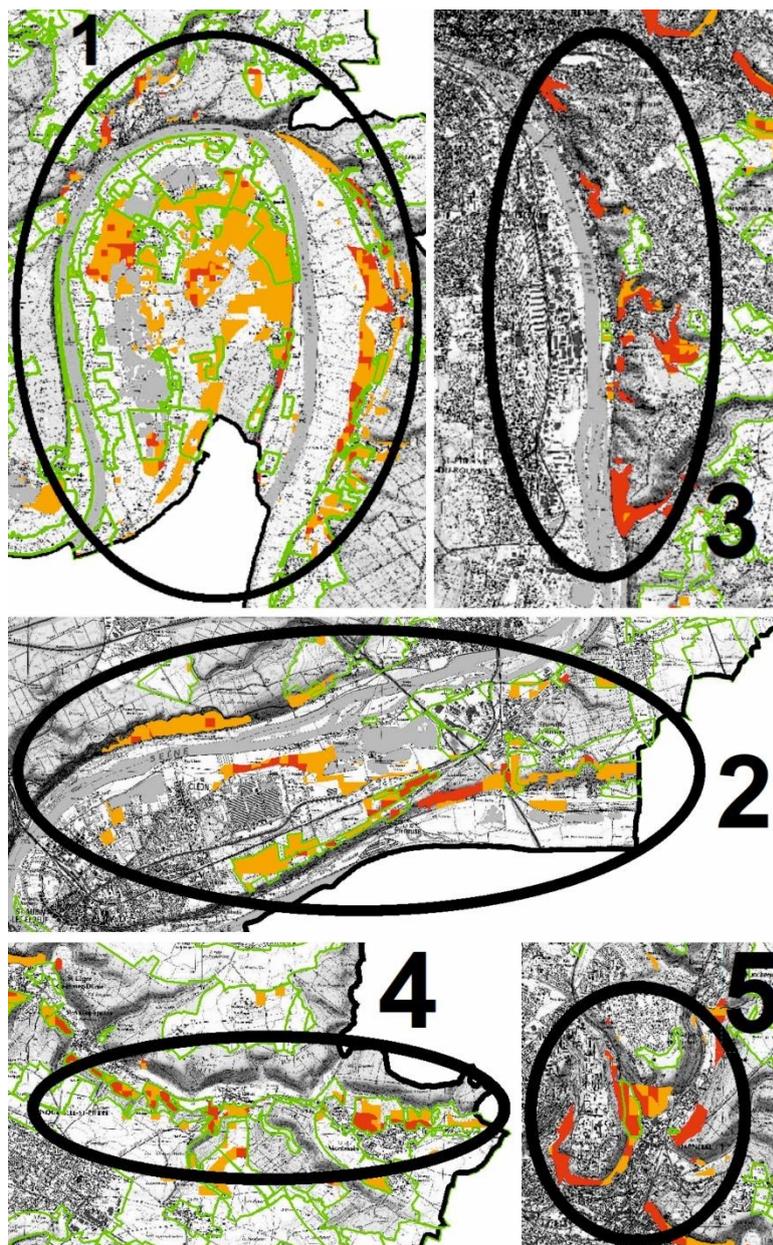


Fig. 160 : Secteurs à faibles potentialités agronomiques en système conventionnel exploités par l'agriculture

La superposition des surfaces à faible potentiel agronomique avec les couloirs et les réservoirs silicoles et calcicoles rend compte d'un lien peu marqué avec les milieux silicoles, comme le montre l'exemple centré sur les communes de Berville-sur-Seine et de Anneville-Ambourville, mais très fort avec les milieux calcicoles comme pour les communes de Quevillon, Saint-Pierre-de-Manneville, Darnetal et Saint-Léger-du-Bourg-Denis (cf. Fig.161). Les documents montrent que les espaces de recouvrements relèvent d'une gestion agricole marginale en milieux silicoles et assez marquée en milieux calcicoles.

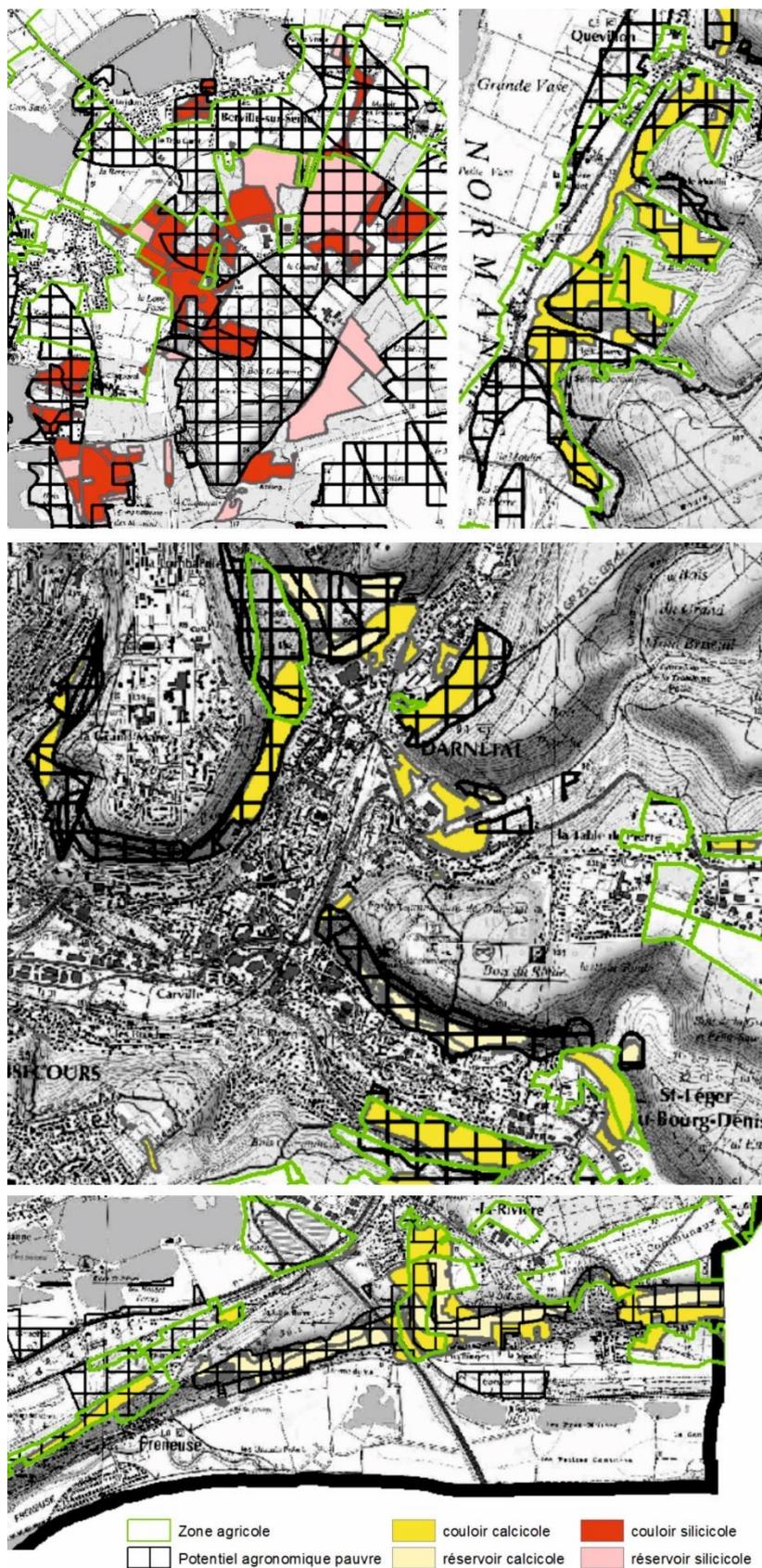


Fig. 161 : Secteurs caractérisés à la fois par des faibles potentialités agronomiques en système conventionnel, des zones agricoles et des réservoirs et couloirs calcicoles et siliceoles

Les situations de chevauchement entre les secteurs à potentiel agronomique pauvre et ceux définis par une vulnérabilité importante de la ressource en eau selon les éléments de la stratégie foncière eau sont fréquentes sur le territoire métropolitain. Cela est bien illustré par les 8 secteurs que nous avons identifiés ci-dessous sur les communes de Duclair, Yainville, Bardouville, Quevillon, la Bouille, Caudebec-les-Elbeuf, Darnetal et Saint-Martin-du-Vivier (cf. Fig.162).

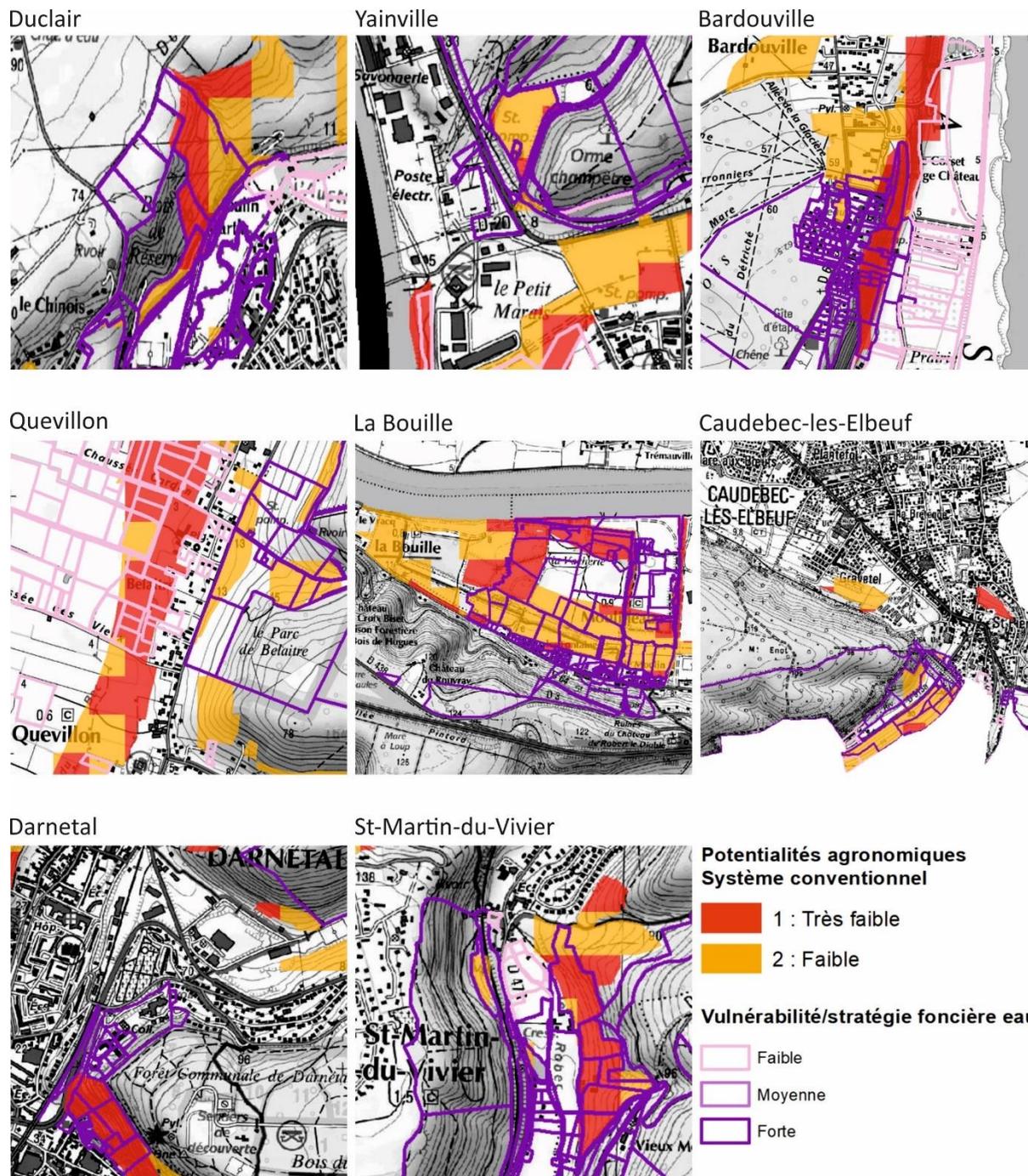


Fig. 162 : Secteurs à faibles potentialités agronomiques en système conventionnel et vulnérabilité de la ressource en eau selon la stratégie foncière eau

## 1.7. Quelle évolution du potentiel agronomique des sols avec le changement climatique ?

Partout dans le monde, le changement climatique est aujourd'hui appréhendé sur la base des 4 scénarios du GIEC que sont le RCP 2.6, le RCP 4.5, le RCP 6.0 et le RCP 8.5, RCP signifie Representative Concentration Pathway et la valeur associée indique le forçage radiatif exprimé en  $W/m^2$ . Le scénario RCP 2.6 est un scénario très ambitieux de réduction des émissions visant à limiter le forçage radiatif à  $2,6 W/m^2$  et nécessiterait des réductions drastiques des émissions de GES et une décarbonisation rapide. A l'opposé, le scénario RCP 8.5 définit la situation la plus pessimiste où les émissions continuent de croître sans efforts significatifs pour les réduire, conduisant à un forçage radiatif de  $8,5 W/m^2$  d'ici 2100.

Entre ces deux scénarios, et pour répondre à une demande de la Chambre d'agriculture de Normandie mobilisée sur la révision du PLUi et du SCoT de la métropole à propos des activités agricoles locales, nous avons utilisé le scénario RCP 4.5 pour modéliser le déficit hydrique annuel des sols agricoles selon une projection à court terme. Le RCP 4.5 représente un scénario de stabilisation des émissions de GES par la mise en place de politiques climatiques modérées. Les émissions de  $CO_2$  atteignent un pic vers 2040, puis diminuent progressivement jusqu'à 2100. Selon les projections du GIEC, le scénario RCP 4.5 pourrait entraîner une augmentation de la température moyenne mondiale d'environ 2 à 3 °C d'ici 2100 par rapport aux niveaux préindustriels.

Le déficit hydrique annuel (sécheresse des sols) a été modélisé selon la méthode du bilan hydrique à partir des données DRIAS de Météo France pour la période 2020/2049 selon le scénario RCP 4.5 et comparé à celui obtenu pour la période 1977/2005 selon les mêmes sources d'information. Les résultats cartographiques sont présentés ci-dessous et tiennent compte des deux contextes climatiques de vallée et de plateau présentés précédemment dans la méthodologie SQUAT.

Pour la période 1977/2005, les surfaces agricoles marquées par un déficit significatif supérieur à 50 mm représentent 465 ha, soit près de 3% de la superficie totale étudiée (cf. Fig.163). Seuls 19 ha sont concernés par une sécheresse édaphique supérieure à 75 mm (0,1% des terres). Pour la période 2020/2049, et selon le scénario RCP 4.5, les surfaces agricoles caractérisées par un déficit hydrique supérieur à 50 mm passeraient de 465 ha à 1 961 ha, soit une multiplication par 4 des surfaces (cf. Fig.164). Pour un déficit supérieur à 75 mm, nos estimations indiquent une multiplication par 10 des surfaces touchées, ce qui représenterait 198 ha et concernerait respectivement 12% et 1,2% des terres agricoles de la métropole.

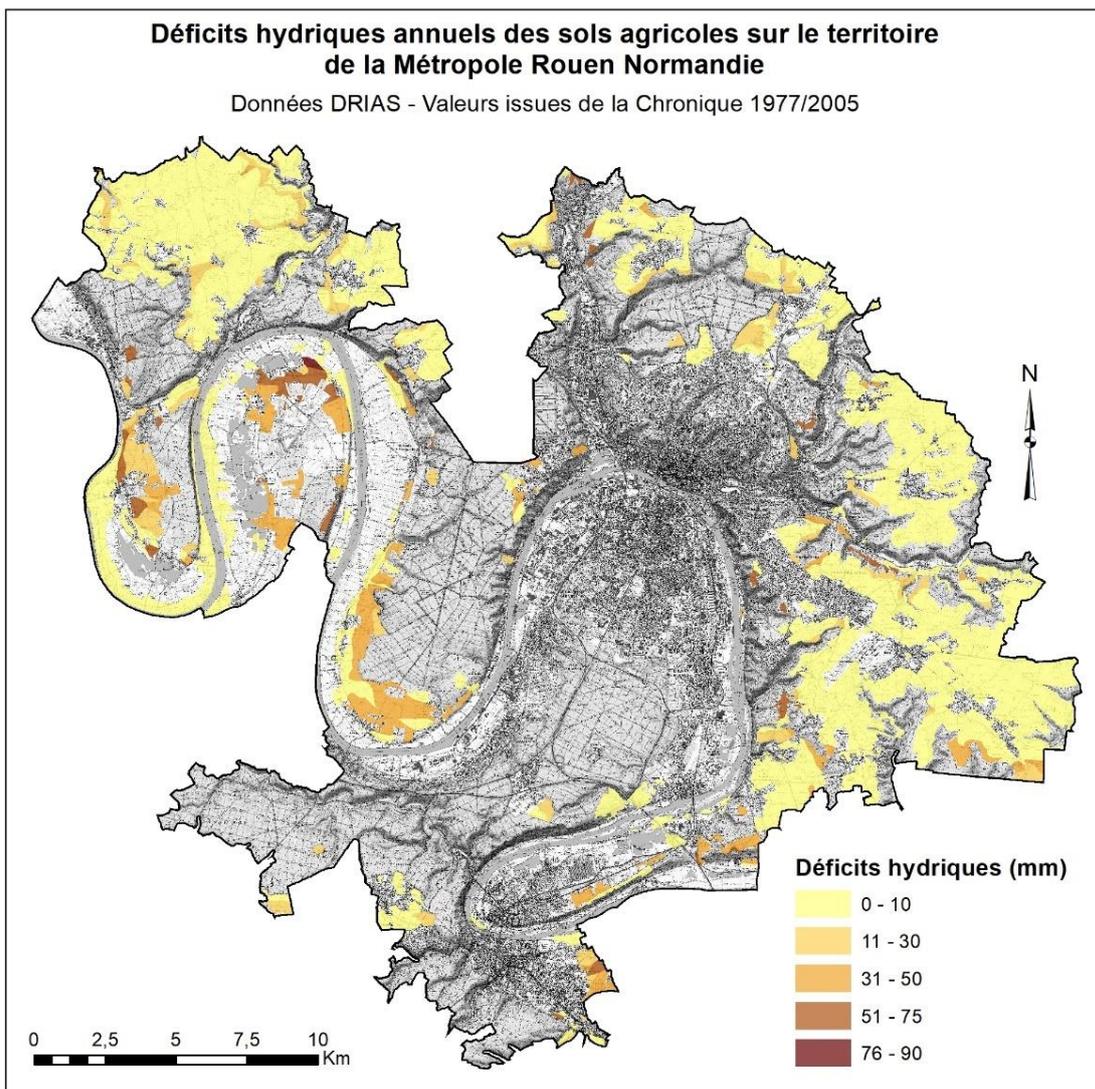


Fig. 163 : Carte des déficits hydriques des sols sur la Métropole pour la période 1977/2005

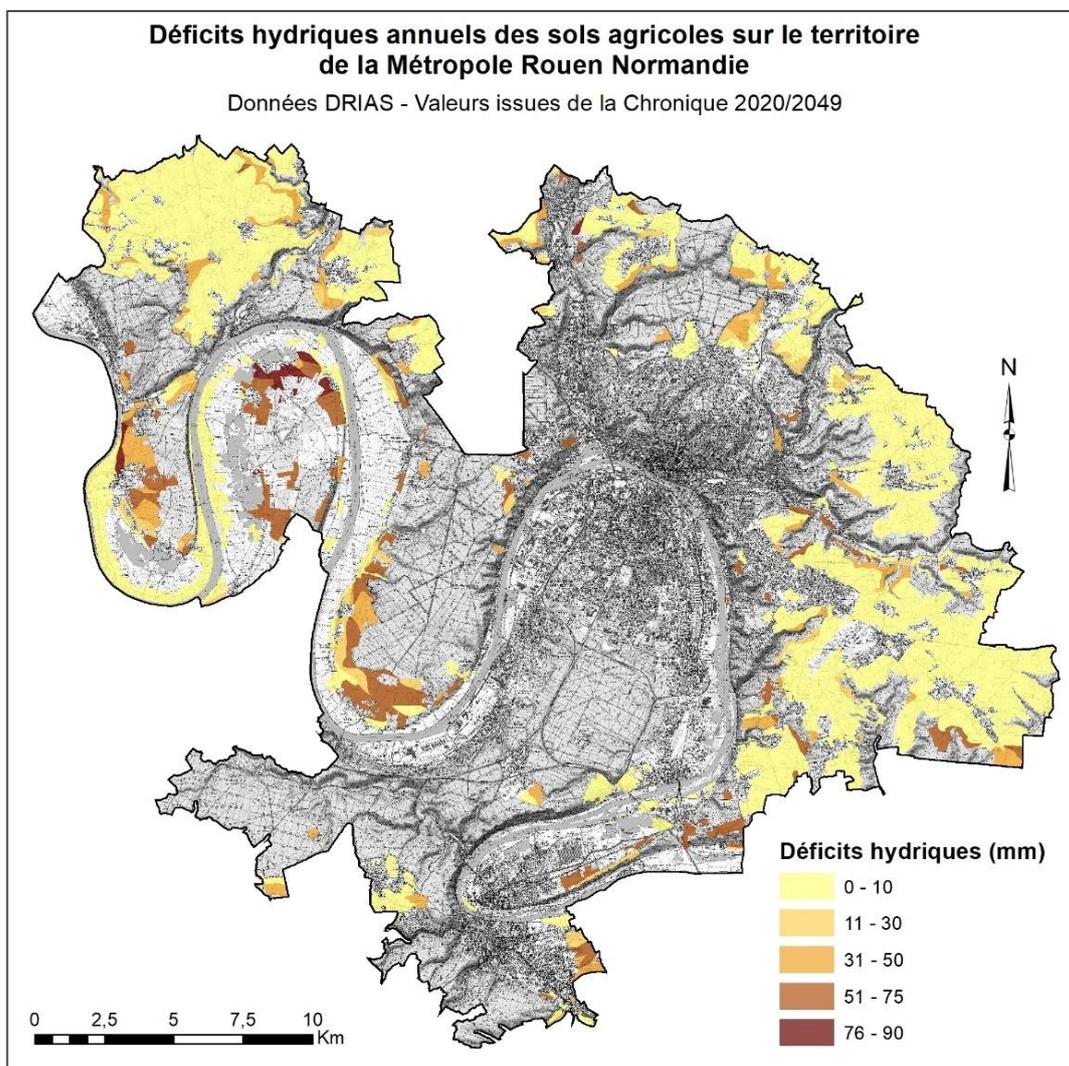


Fig. 164 : Carte des déficits hydriques des sols sur la Métropole pour la période 2020/2049 selon le scénario RCP 4.5 du GIEC

Les illustrations suivantes précisent les contextes les plus sensibles au réchauffement climatique (cf. Fig.165). Il s'agit prioritairement des secteurs de bas de versant de la vallée de la Seine délimités par les alluvions anciennes et les rebords de plateau qui reposent sur les argiles à silex et sur la transition argiles à silex/craie crétacée. On note par ailleurs, que les effets attendus d'un forçage radiatif modéré sur les sols limoneux de plateau sembleraient nuls.

Ces premiers résultats soulèvent trois remarques. Tout d'abord, en dépit d'un scénario RCP modéré et d'une projection à court terme du réchauffement climatique, les conséquences attendues sur l'intensification de la sécheresse des sols agricoles sont déjà significatives. Ensuite, les évaluations des politiques actuelles par le Programme des Nations Unies pour l'environnement suggèrent qu'il faudrait que tous les engagements actuels soient pleinement respectés pour limiter un réchauffement global d'environ 2,7 à 3,2 °C d'ici 2100, ce qui semble peu probable. Aussi, on pourrait progressivement se rapprocher des scénarios RCP 6.0 et 8.5 qui envisagent un réchauffement autour de 4°C d'ici la fin du siècle. De ce fait, il serait opportun de modéliser le déficit hydrique des sols agricoles selon le scénario RCP 8.5. Enfin, il serait nécessaire de mener ce travail dans le cadre des projections du GIEC à moyen terme (2041/2060) et à long terme (2081/2100) afin de fournir de nouveaux éléments de réflexion à propos de la planification de l'économie agricole sur le territoire de la métropole Rouen Normandie.

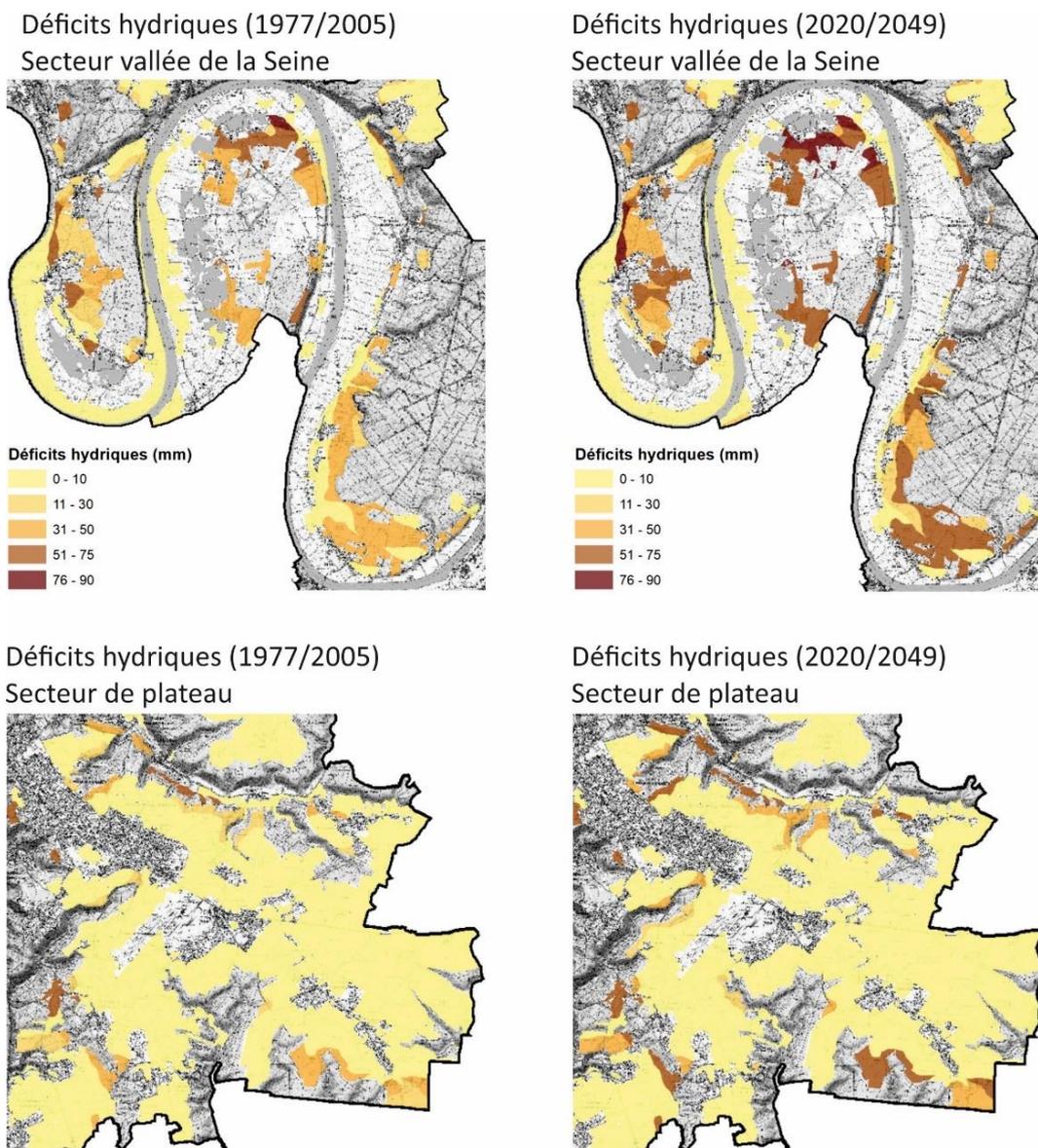


Fig. 165 : Contextes les plus sensibles au réchauffement climatique

## 2. Les enjeux liés à l'aléa et au risque d'érosion hydrique des sols

Les questions qui étaient posées sont les suivantes :

- Y-a-t-il des secteurs, puis des communes plus sensibles à l'érosion ? Y en-a-t-il aux abords des zones U ? Des zones AU ou sur les zones AU ? La densification de ces secteurs ou leur urbanisation renforcerait-elle cet aléa ?
- Quelle est la part des zones sensibles à l'érosion en zone A ? en zone N ? Sur les zones les plus sensibles, quels sont les systèmes de production agricole majoritairement en place (culture/élevage...) ?

- Y a-t-il des zones sensibles à l'érosion avec un bon potentiel agronomique pour l'élevage ? pour le maraichage ? Ces secteurs sont-ils vulnérables à la ressource en eau ?
- Y a-t-il des zones sensibles à l'érosion à l'amont de bétouilles tracées positivement avec des captages AEP ?
- Cela revient-il à affiner le zonage existant de l'aléa érosion effectué par le BRGM ?

## 2.1. De l'aléa au risque d'érosion hydrique

L'aléa érosion hydrique désigne la probabilité qu'un événement d'érosion se produise, indépendamment des conséquences possibles. Le risque d'érosion hydrique intègre l'aléa mais aussi les éléments exposés et leur vulnérabilité. Il s'agit de l'évaluation des dommages potentiels causés par l'érosion hydrique en tenant compte des conséquences pour les personnes, les biens et les infrastructures. Ces deux notions sont donc complémentaires et seront abordées factuellement dans ce chapitre.

### 2.1.1. Quelle est la part des zones sensibles à l'érosion hydrique en zone A et en zone N ?

La cartographie de l'aléa et de la prédisposition à l'aléa érosion hydrique de niveau assez fort souligne des contextes différents pour les espaces agricoles et naturels (cf. Fig.166). En zone A, cet aléa érosion couvre une surface de 2 605 ha, soit 16% des terres agricoles. En s'appuyant sur les données annuelles du RPG pour la période 2016-2022, seuls 7% de ces surfaces sont systématiquement mises en culture, ce qui représente 181 ha. Les autres surfaces attestent la présence d'un couvert végétal annuel ou pluriannuel intercalé entre les cultures. **L'aléa érosion affecte les parties intérieures et les rebords du plateau ainsi que les bas de versants de la vallée de la Seine.**

**En zone N, la prédisposition à l'aléa assez fort s'observe sur tous les versants pentus de la vallée de la Seine et les hauts ou les bas de versant des vallées secondaires.** Il occupe une superficie de 1 366 ha, soit en proportion 1 ha sur 5. En raison de l'imprécision de la base de données Zone N, il est probable qu'une partie de cette superficie fasse l'objet d'une valorisation sous la forme de cultures, ce qui laisse à penser que les surfaces agricoles à aléa assez fort sous-estimées.

### 2.1.2. Quelles sont les communes et les secteurs les plus sensibles à l'érosion hydrique ? Cela concerne-t-il les zones AU ? La densification de ces secteurs ou leur urbanisation renforcerait-elle l'aléa érosion hydrique ?

En zone A, certaines communes sont plus particulièrement concernées par un aléa assez fort en termes de surface (cf. Fig.167). Il s'agit de Saint-Pierre-de-Manneville, Sahurs, Hautot-sur-Seine, La Londe, Houpeville, Isneauville, Roncherolles-sur-le-Vivier, La Neuville-Chant-d'Oisel et Saint-Jacques-sur-Darnetal.

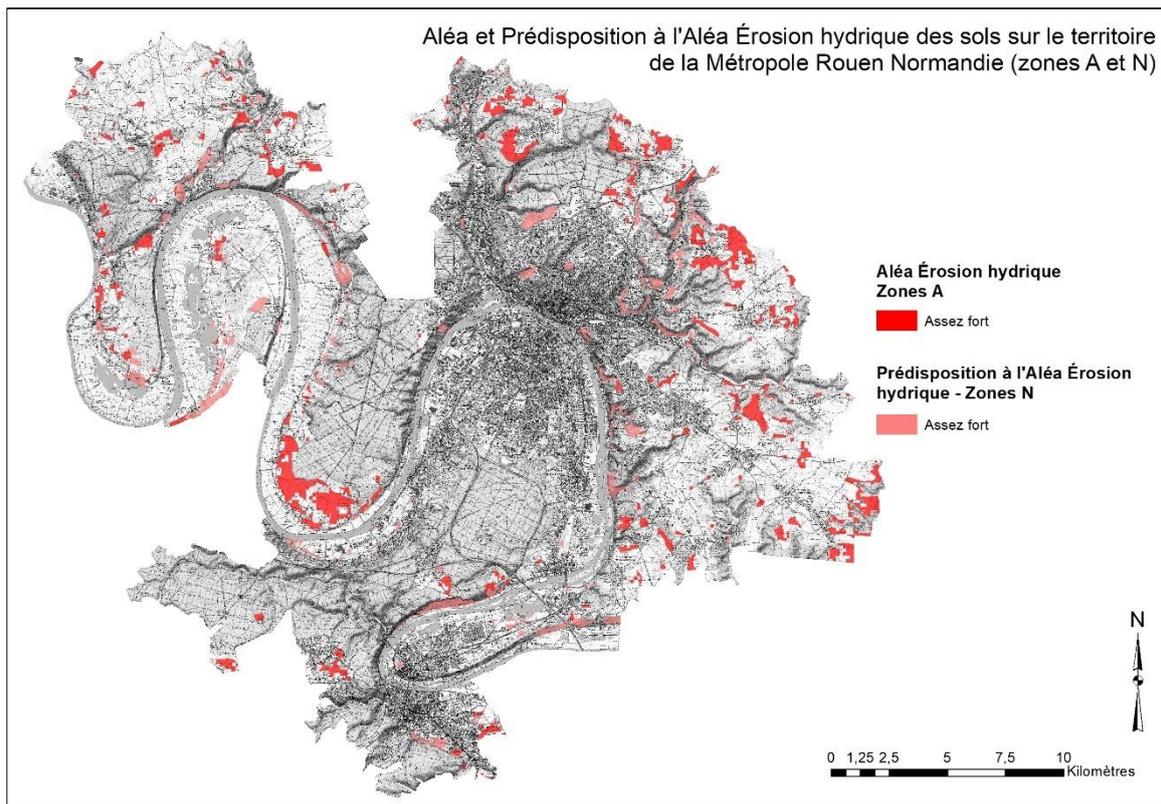
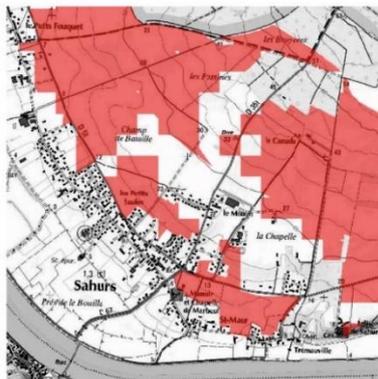


Fig. 166 : Carte de l'aléa et de la prédiposition à l'aléa érosion hydrique de niveau assez fort sur la Métropole

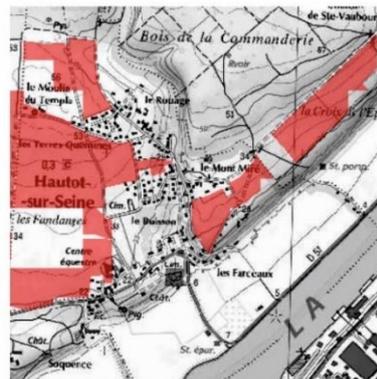
Saint-Pierre-de-Manneville



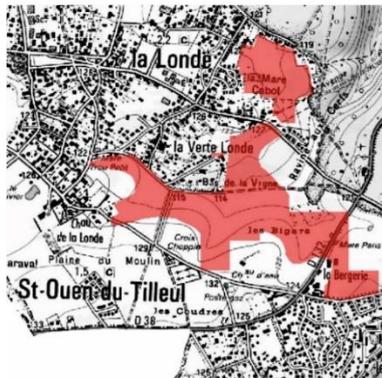
Sahurs



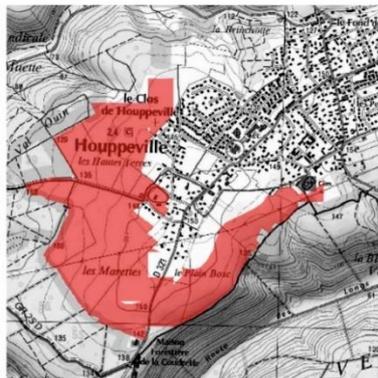
Hautot-sur-Seine



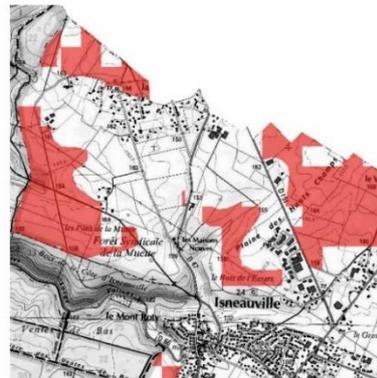
La Londe



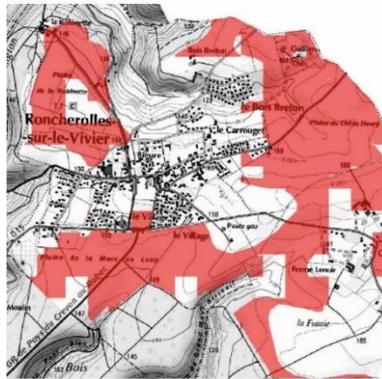
Houpeville



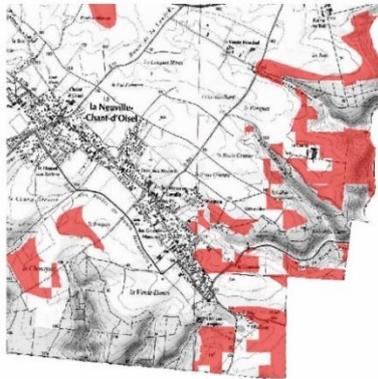
Isneauville



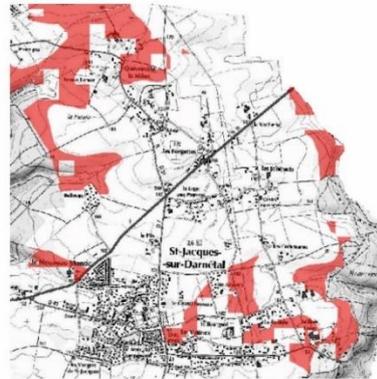
Roncherolles-sur-le-Vivier



La Neuville-Chant-d'Oisel



Saint-Jacques-sur-Darnetal

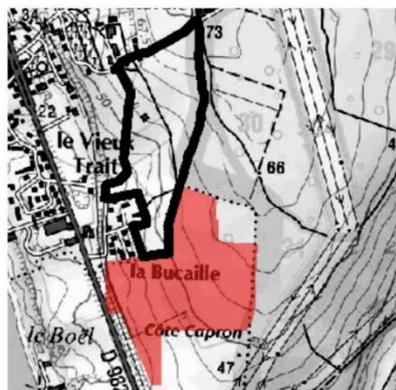
**Aléa Érosion hydrique**

■ 4 : Assez fort

Fig. 167 : Secteurs concernés par un aléa assez fort en zone A

La recherche de configurations caractérisant les secteurs d'aléa assez fort situés en amont et au contact des zones AU permettent d'identifier les situations théoriques de risque d'érosion hydrique. Les résultats ci-dessous montrent que ce contexte a été identifié 5 fois sur les communes de Le trait, Yainville, Le Mesnil-sous-Jumièges, Sahurs et Hautot-sur-Seine (cf. Fig.168). Pour les 3 premières communes, le contact amont/aval entre l'aléa érosion et la zone AU ne porte que sur une partie limitée de la zone à urbaniser. Pour Sahurs et Hautot-sur-Seine, la zone de contact amont/aval affecte l'intégralité de la zone AU : le risque d'érosion hydrique est alors le plus fort.

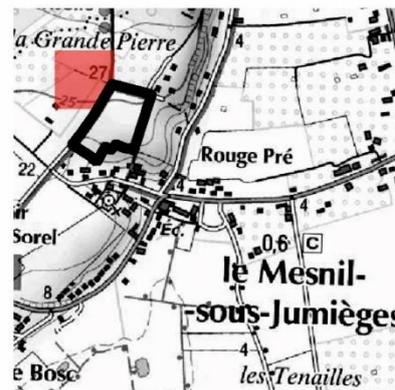
Le Trait



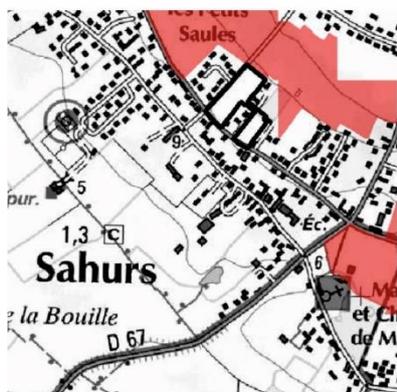
Yainville



Le Mesnil-sous-Jumièges



Sahurs



Hautot-sur-Seine

**Aléa Érosion hydrique**

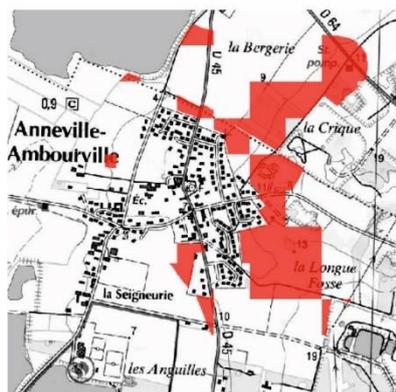
- 4 : Assez fort
- Zone AU

Fig. 168 : Secteurs concernés par un risque théorique d'érosion hydrique en zone AU

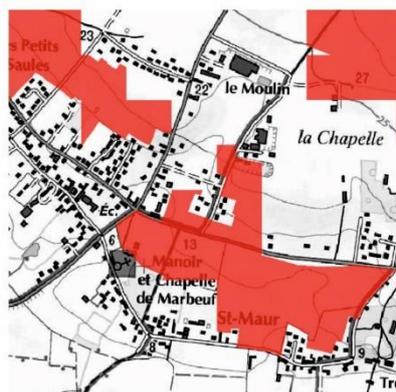
En procédant de manière analogue entre les secteurs d'aléa assez fort et les zones déjà urbanisées, on bascule d'un risque théorique à un risque réel. L'analyse territoriale menée en ce sens témoigne de situations à risque très limitées (cf. Fig.169). En contexte de plateau, elles s'expliquent par un positionnement des zones urbaines et péri-urbaines sur les parties les plus hautes qui, de ce fait, se retrouvent en amont des surfaces à aléa assez fort. Dans les vallées, l'urbanisation s'est implantée sur des topographies planes de fond de vallée ou sur les bas de versants à pente douce, là où le phénomène d'érosion ne peut pas s'exprimer. Les cas de figures ci-dessous ne répondent pas à ces deux types de configuration. Ils témoignent des situations à risque important sur les communes d'Anneville-Ambourville, de Sahurs et de Malaunay pour lesquelles, situations qui se répètent plusieurs fois en différents endroits pour chacune des 3 communes.

Dans le cas de ces zones urbanisées comme pour les zones AU marquées par un risque théorique, toute perspective d'urbanisation ou d'étalement urbain s'accompagnerait d'une augmentation des surfaces à risque d'érosion hydrique assez fort.

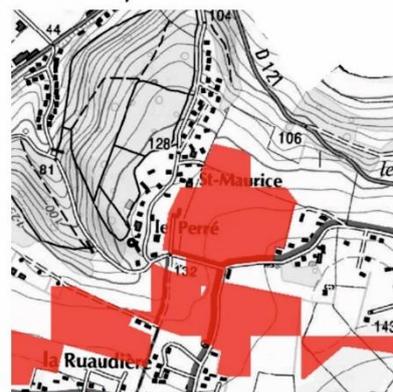
## Anneville-Ambourville



## Sahurs



## Malaunay



 Aléa Erosion hydrique assez fort

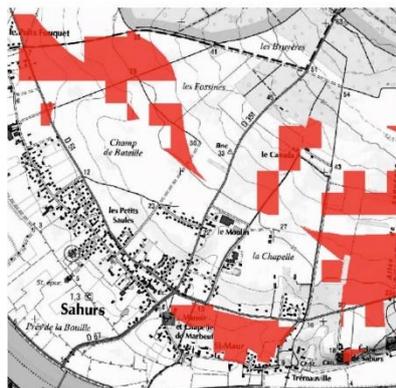
Fig. 169 : Secteurs concernés par un risque réel d'érosion hydrique en zone U

## 2.2. Quels sont les secteurs à bon potentiel agronomique et à aléa érosion hydrique assez fort en système maraîcher et système d'élevage ?

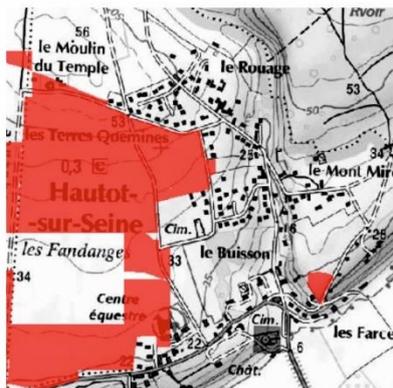
En système maraîcher, les terres à potentiel agronomique élevé et très élevé concernées par un aléa érosion hydrique assez fort couvrent une superficie de près de 1 000 ha (970 ha, 6% des zones A). Les communes où les bons sols pour le maraîchage sont les plus menacés par l'érosion hydrique sont présentées ci-dessous (cf. Fig.170). Il s'agit des communes de Sahurs, Hautot-sur-Seine, La Neuville-Chant-d'oiseil, Boos/Franqueville-Saint-Pierre, Saint-Jacques-sur-Darnetal, Roncherolles-sur-le-Vivier, Isneauville, Houpeville et Malaunay.

En croisant cette configuration aux secteurs pour lesquels la vulnérabilité de l'eau est forte selon les éléments de la stratégie foncière, on peut identifier les contextes où l'érosion hydrique est susceptible de menacer à la fois les terres agricoles à bon potentiel agronomique pour le maraîchage et la ressource en eau (cf. Fig.171). Nous avons trouvé ce cas de figure dans les communes de Val-de-la-Haye, Saint-Aubin-Epinay et Saint-Léger-du-Bourg-Denis. Une attention particulière doit être portée à ces situations en matière de gestion agricole.

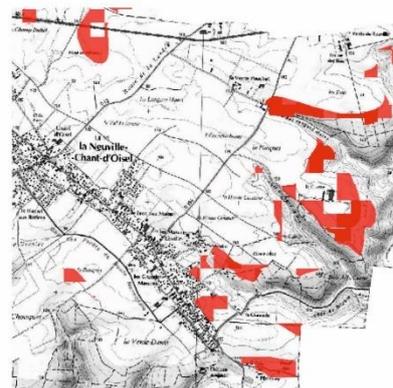
Sahurs



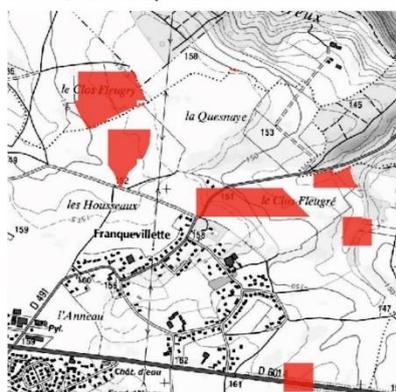
Hautot-sur-Seine



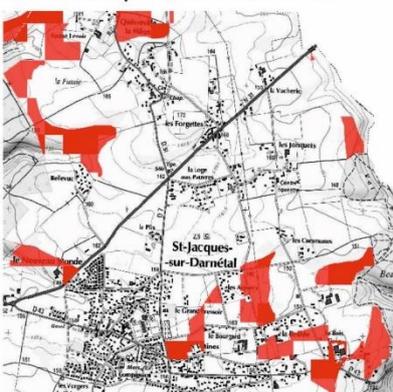
La Neuville-Chant-d'Oisel



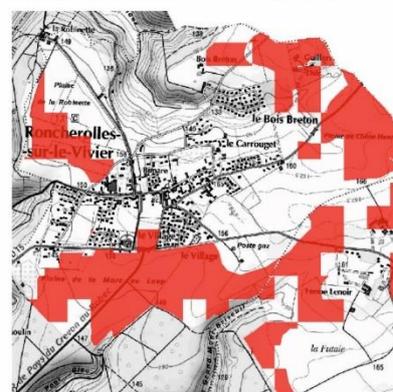
Boos/ Franqueville-Saint-Pierre



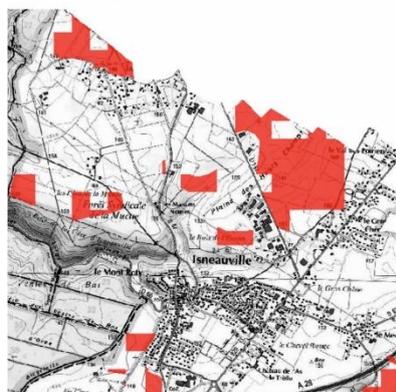
Saint-Jacques-sur-Darnétal



Roncherolles-sur-le-Vivier



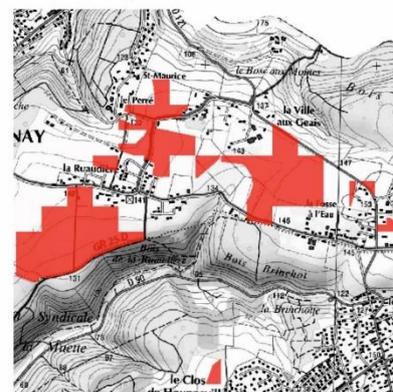
Isneauville



Houpeville



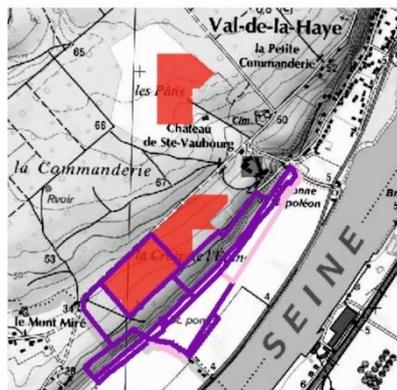
Malaunay



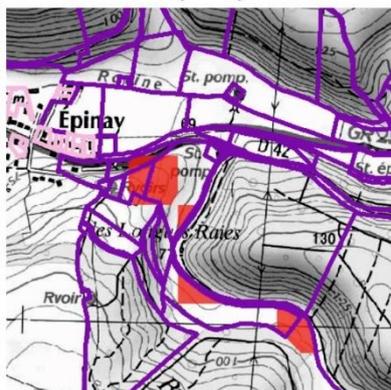
 Potentialités agronomiques élevées en système Maraîchage et Aléa érosion hydrique assez fort

Fig. 170 : Secteurs concernés par des bonnes potentialités agronomiques en système maraîchage et un aléa érosion hydrique assez fort

## Val-de-la-Haye



## Saint-Aubin-Epinay



## Saint-Léger-du-Bourg-Denis

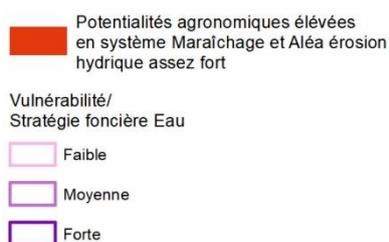
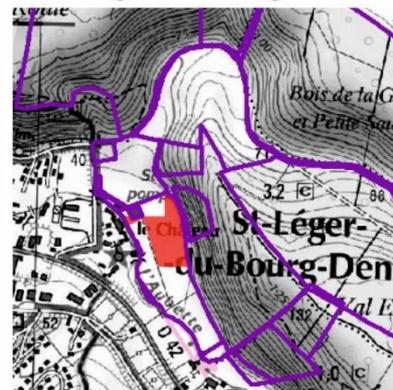
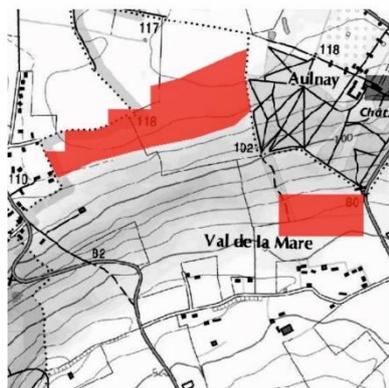


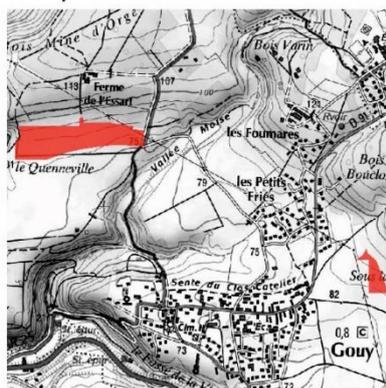
Fig. 171 : Secteurs concernés par des bonnes potentialités agronomiques en système maraîchage, un aléa érosion hydrique assez fort et une vulnérabilité de la ressource en eau selon la stratégie foncière eau

En système d'élevage, les terres à fort potentiel agronomique et affectées par un aléa érosion hydrique assez fort ne représentent que 230 ha (1,4% des zones A) et concernent les communes de Duclair, Gouy, La Neuville-Chant-d'oiseil, Boos/Franqueville-Saint-Pierre, Roncherolles-sur-le-Vivier et Isneauville (cf. Fig.172). Nous n'avons pas relevé de situations où l'aléa érosion est susceptible de dégrader les terres d'élevage à bon potentiel agronomique et la ressource en eau située en zone de forte vulnérabilité.

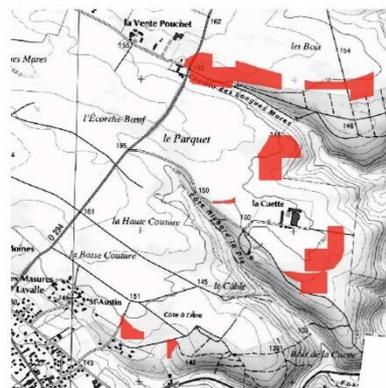
Duclair



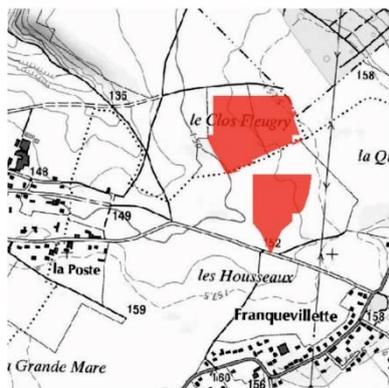
Gouy



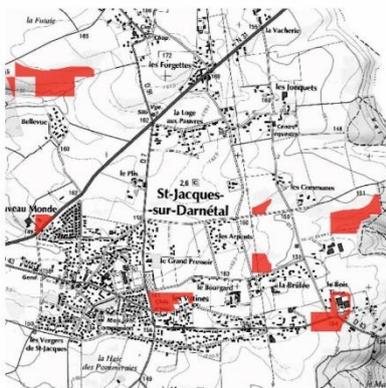
La Neuville-Chant-d'Oisel



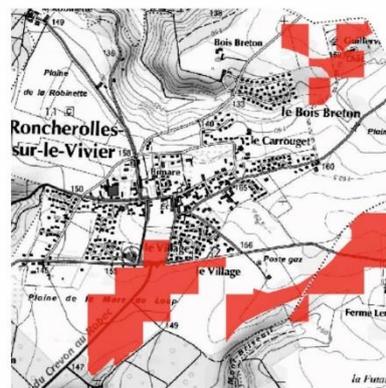
Boos/ Franqueville-Saint-Pierre



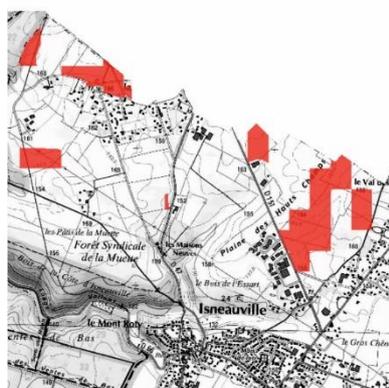
Saint-Jacques-sur-Darnetal



Roncherolles-sur-le-Vivier



Isneauville



 Potentialités agronomiques élevées en système Elevage et Aléa érosion hydrique assez fort

Fig. 172 : Secteurs concernés par des bonnes potentialités agronomiques en système élevage et un aléa érosion hydrique assez fort

### 2.3. Les captages AEP sont-ils caractérisés par un aléa érosion hydrique assez fort en connexion hydraulique avec des bétaires ?

Le territoire de la Métropole Rouen Normandie compte 335 bétaires recensées à ce jour et répertoriées par le BRGM. La présence de bétaires dans les surfaces d'aléa érosion hydrique assez fort ou à leur contact en position aval permet d'appréhender des situations d'infiltration ponctuelle du ruissellement érosif. Si une telle configuration s'inscrit dans le périmètre des captages AEP, cette situation peut générer ou accentuer une situation de vulnérabilité de la ressource en eau. Celle-ci a été relevée à de nombreuses reprises et concernent plus particulièrement les communes de Saint-

Paër, Saint-Marguerite-sur-Duclair, Saint-Pierre-de-Varengville, La Londe, Ymare, La Neuville-Chant-d'Oisel, Roncherolles-sur-le-Vivier et Isneauville (cf. Fig.173). Toutefois, les cas de recouvrement avec des périmètres de captages AEP sont rares. Ils concernent les captages d'Orival et des Ecameaux sur La Londe et du captage de Darnetal sur Roncherolles-sur-le-Vivier.



Fig. 173 : Secteurs concernés par des bonnes potentialités agronomiques en système maraîchage, un aléa érosion hydrique assez fort et la présence de bétoires

## 2.4. Quelle articulation entre l'aléa érosion hydrique selon SCALES et l'aléa défini par le BRGM ?

Nous ne reviendrons pas sur la méthodologie SCALES pour évaluer l'aléa érosion hydrique des sols mais rappelons tout de même que les résultats produits sont restitués à la maille carrée de 150 m de côté et que les données Sol mobilisées ont une précision spatiale d'échelle 1/50 000. La représentation cartographique de l'aléa par le BRGM fournit une valeur unique par bassin versant et repose sur l'application du modèle d'érosion d'Yves Le Bissonnais dont les valeurs en sortie de modèle ont été validées et/ou corrigées par des experts des 6 Directions de Secteur de l'Agence de l'eau Seine-Normandie. Il est important de préciser que la carte de l'aléa érosion hydrique du BRGM s'est appuyée sur les données Sol nationale de précision 1/1 000 000.

Les résultats SCALES (zones A) et BRGM centrés sur le territoire métropolitain sont présentés ci-dessous (cf. Fig.174). Bien évidemment, il ne s'agit pas de comparer les niveaux de précision de ces deux cartes puisqu'elles renvoient à des unités spatiales d'intégration des niveaux d'aléa très différentes. Il est plus intéressant de faire ressortir un niveau d'aléa général selon SCALES et de le confronter à celui des bassins versants situés sur la même aire géographique. Cette approche permet de montrer différents cas de figure que nous avons délimités par des cercles de différentes couleurs. Les cercles rouges indiquent des valeurs d'aléa plus élevée du BRGM par rapport à ce que nous avons estimé. C'est l'inverse pour le secteur à l'intérieur du cercle bleu. Enfin, nous relevons deux situations où les résultats de SCALES et du BRGM sont assez comparables (cercles verts).

La cartographie de l'aléa érosion hydrique des sols selon SCALES ne doit pas être perçue comme le moyen d'affiner le zonage existant de l'aléa effectué par le BRGM puisque les modèles utilisés sont conçus différemment et que les données d'entrée n'ont pas la même précision spatiale. A l'échelle d'une planification territoriale intégrant les propriétés et fonctions des sols pour répondre aux enjeux de développement durable, les données SCALES doivent bien évidemment être privilégiées.

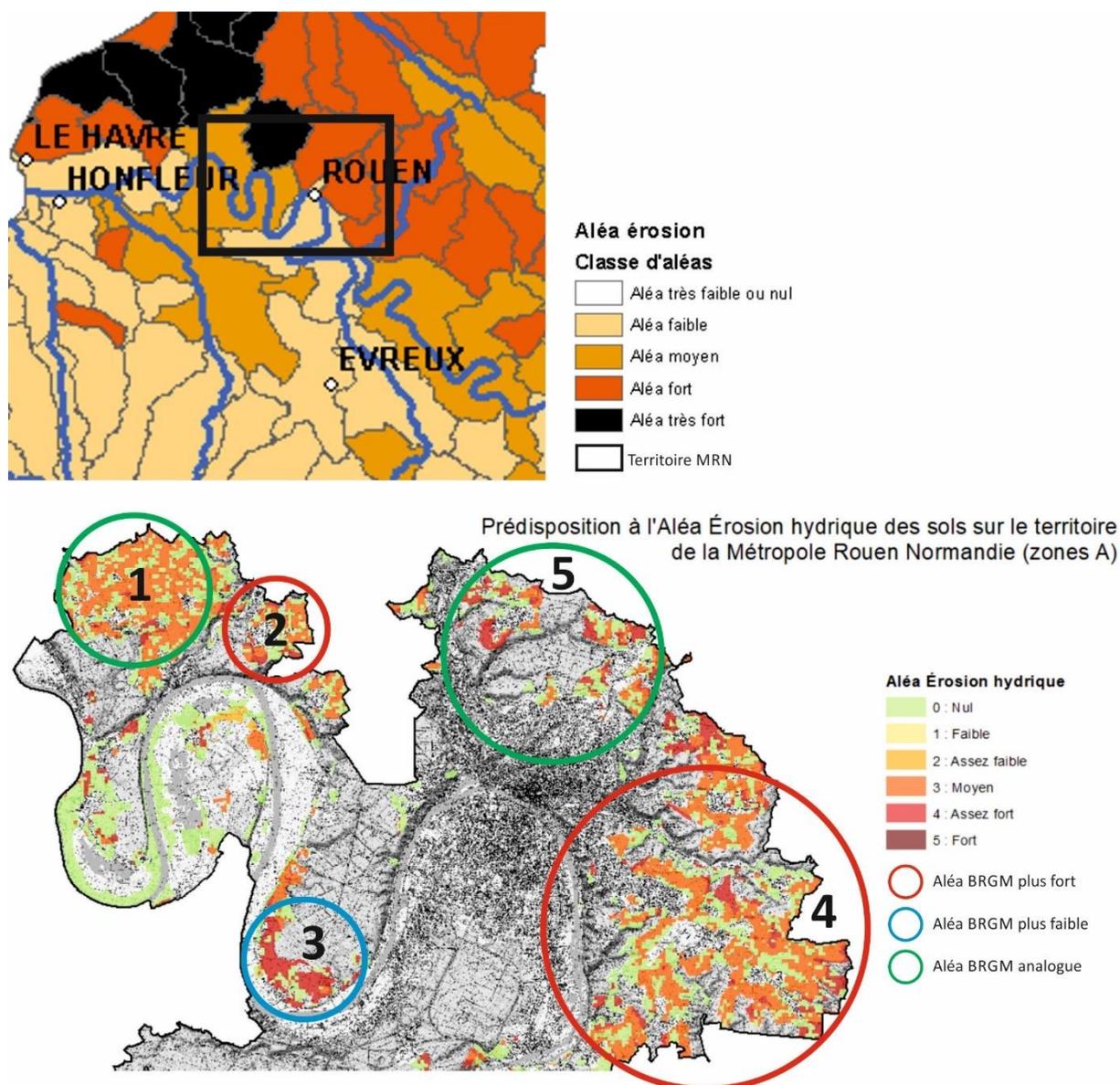


Fig. 174 : L'aléa érosion hydrique des sols selon le BRGM (carte du haut) et SCALES (carte du bas)

### 3. Les enjeux mobilisant les fonctions et la multifonctionnalité des sols

#### 3.1. La régulation du cycle de l'eau des zones AU et la préservation de la ressource en eau

La régulation du cycle de l'eau par les sols joue un rôle crucial dans la protection de la ressource en eau. Les sols facilitent l'infiltration de l'eau de pluie, permettant ainsi la recharge des nappes phréatiques. Cette action est essentielle pour maintenir les réserves d'eau souterraine destinées notamment à l'alimentation en eau potable des populations. Ils agissent comme un filtre naturel qui élimine les contaminants de l'eau de surface avant qu'elle ne pénètre dans les nappes phréatiques.

Les sols réduisent également le ruissellement en augmentant l'infiltration. Moins de ruissellement signifie moins d'érosion des sols, ce qui réduit la sédimentation dans les cours d'eau et les réservoirs.

Ils jouent enfin un rôle dans la régulation des débits fluviaux en stockant l'eau et en la libérant progressivement. Cette capacité tampon des sols contribue à atténuer les crues en période de fortes précipitations et à maintenir les débits des cours d'eau pendant les périodes sèches, assurant ainsi une disponibilité continue de l'eau pour les écosystèmes et les usages humains.

De ce fait, l'urbanisation conduit bien souvent à une imperméabilisation qui s'accompagne d'une perte de régulation du cycle de l'eau des sols. La caractérisation de la fonction de régulation du cycle de l'eau pour les zones AU permet de mesurer l'impact qualitatif et quantitatif d'une possible urbanisation sur la ressource en eau. Les résultats obtenus montrent que 422 ha de zone AU présentent une fonction de régulation de niveau assez élevé et 122 ha de niveau élevé, le cumul de ces surfaces représentant près de 80% des zones AU. Par conséquent, l'urbanisation des zones AU se traduirait par une perte de surfaces susceptibles de participer à la protection de la ressource en eau.

Par ailleurs, certaines zones AU ayant une fonction de régulation du cycle de l'eau sont situées à l'intérieur ou à proximité immédiate des zones vulnérables selon les éléments de la stratégie foncière eau. On retrouve ce cas de figure sur les communes de La Bouille, Jumièges, Oissel, Fontaine-sous-Préaux, Le Houllme et Yainville (cf. Fig.175).



Fig. 175 : Secteurs en zone AU caractérisés par une bonne fonction de régulation du cycle de l'eau et une vulnérabilité de la ressource en eau selon la stratégie foncière eau

### 3.2. Les sols à fonction élevée de production de biomasse et de réservoir de biodiversité sont-ils les mêmes ?

La production de biomasse des sols et leur rôle comme réservoir de biodiversité sont étroitement liés. Un sol riche en biodiversité est plus fertile, mieux structuré, plus résilient, ce qui améliore sa capacité à supporter une agriculture productive. Inversement, un sol à bon potentiel agronomique sera favorable à la biodiversité des sols qui contribue à son tour à leur santé et à leur productivité, créant un cercle vertueux qui soutient à la fois la biodiversité et la production agricole. Les données issues de MUSE indiquent que cette corrélation est partiellement vérifiée.

En zones A et N, les sols ayant une fonction assez élevée et élevée de production de biomasse et de réservoir de biodiversité couvrent une surface de 7 711 ha, ce qui représente 34% de la superficie totale étudiée. Le lien entre ces deux fonctions n'est pas clairement établi sans pour autant être contredit puisque nous n'observons aucun secteur marqué par des sols à la fois favorables à la production de biomasse et dotés d'une faible fonction de réservoir de biodiversité. Il faut également indiquer que la détermination de la fonction de réservoir de biodiversité des sols s'appuie sur des références bibliographiques faisant mention de travaux nationaux alors que la fonction de production de biomasse a été appréciée à partir des données du Référentiel pédologique de la Métropole.

En zone AU, les surfaces aux niveaux assez élevée et élevée pour ces deux fonctions ne concernent qu'1 ha sur 6 (17%). Mais là aussi, cela ne signifie pas que ces fonctions sont antinomiques puisqu'il n'existe pas de secteurs en zone AU associant fonction significative de production de biomasse et faible fonction de réservoir de biodiversité.

Pour les zones A, N et AU, on ne peut pas démontrer un lien étroit entre ces deux fonctions sans pour autant considérer qu'elles s'opposent.

### 3.3. Quelle relation peut-on établir entre les bons réservoirs de biodiversité des sols selon MUSE et les réservoirs de biodiversité et corridors écologiques de la TVB de la Métropole ?

La Trame verte et bleue (TVB) vise à préserver et restaurer les continuités écologiques pour maintenir la biodiversité. Dans ce cadre, deux éléments principaux sont définis : les réservoirs de biodiversité et les corridors écologiques. Les réservoirs de biodiversité sont des zones géographiques qui présentent une grande richesse en espèces et en habitats naturels. Ils jouent un rôle crucial dans la conservation de la biodiversité en fournissant des conditions favorables à la survie et à la reproduction des espèces. Ces zones peuvent inclure des forêts, des zones humides ou bien encore des prairies. Les corridors écologiques sont des éléments de paysage qui relient les réservoirs de biodiversité. Ils permettent aux espèces de se déplacer, de se reproduire, de se nourrir et de maintenir des échanges génétiques entre populations. Les corridors sont essentiels pour la résilience des écosystèmes face aux pressions anthropiques et aux changements climatiques. Ils peuvent être apparentés aux haies, aux cours d'eau et leurs rives ou également aux bandes boisées le long des routes et des chemins.

La fonction de réservoir de biodiversité des sols est un élément supplémentaire à prendre en compte dans la conservation de la biodiversité et le maintien des fonctions écologiques des paysages. Elle permet de conforter la délimitation des réservoirs de biodiversité et des corridors écologiques. Elle peut apporter aussi un éclairage nouveau dans des perspectives de révision de la TVB.

Le croisement des surfaces à bon réservoir de biodiversité des sols avec ceux définis par la TVB montre une concordance presque totale. 96% des zones A et N à réservoir assez élevé et élevé sont corrélées avec la présence des réservoirs de biodiversité de la TVB. Ce % est analogue pour les zones AU.

En zones A et N, on peut mentionner plus particulièrement les communes de Le Trait, Jumièges, Le Mesnil-sous-Jumièges, Hénouville, Saint-Martin-de Boscherville, Yville-sur-Seine, Saint-Pierre-de Manneville, Sahurs, Belbeuf, Darnetal, Saint-Léger-du-Bourg-Denis et Mont-Saint-Aignan qui témoignent de cette étroite relation (cf. Fig.176).

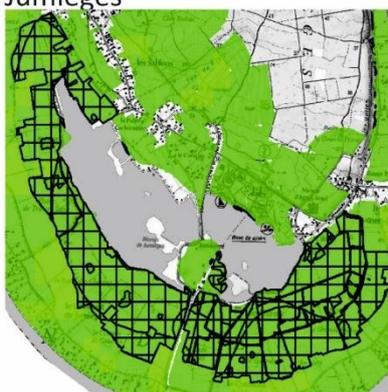
En zone AU, ce constat est corroboré sur les communes de Le Trait, Yainville, Jumièges, Duclair, Saint-Etienne-du-Rouvray, Saint-Aubin-Celloville, Bonsecours et Fontaine-sous-Préaux (cf. Fig.177).

Ce qui est vérifié pour les réservoirs de biodiversité l'est aussi pour les corridors écologiques puisque seuls 3% de leur surface sont caractérisés par un réservoir moyen de biodiversité de sol. Nous n'avons jamais rencontré de situations pour lesquelles les éléments principaux de la TVB sont en recouvrement d'un faible réservoir de biodiversité des sols. Les communes qui témoignent le mieux de cette relation entre réservoir de biodiversité des sols et corridors écologiques sont présentées dans l'illustration ci-dessous (cf. Fig.177). Il s'agit des communes de Yainville, Jumièges, Le Mesnil-sous-Jumièges, Hénouville, Saint-Martin-de Boscherville, Yville-sur-Seine, Saint-Pierre-de Manneville, Quevillon, Gouy, Saint-Aubin-Epinay et Malaunay.

Le Trait



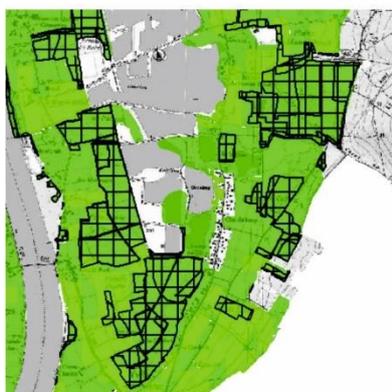
Jumièges/ Le Mesnil-sous-Jumièges



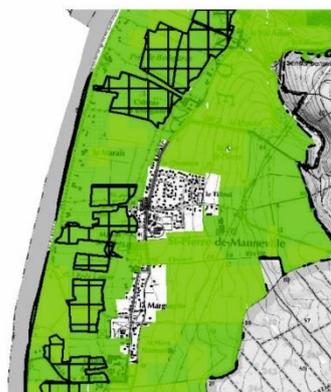
Henouville/ St-Martin-de-Boscherville



Yville-sur-Seine



St-Pierre-de-Manneville



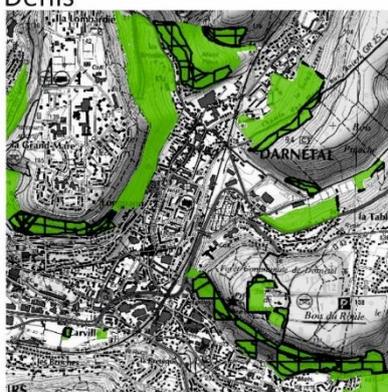
Sahurs



Belbeuf



Darnetal/St-Léger-du-Bourg-Denis



Mont-St-Aignan



**Réservoir de biodiversité des sols (MUSE)**

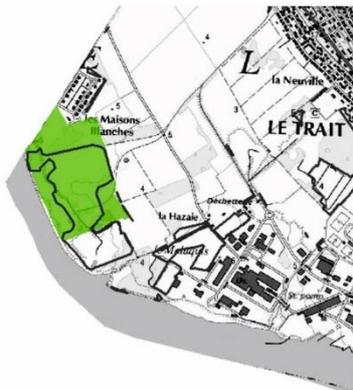
- 4 : Assez élevé
- 5 : Élevé

Réservoir de biodiversité (TVB)

Fig. 176 : Secteurs en zones A et N caractérisés par un bon réservoir de biodiversité selon MUSE et selon la TVB

NB : Cette analyse repose sur les éléments issus de la TVB du SCOT de 2015 et non sur la TVB actualisée de 2024 que nous n'avons pas encore en notre possession.

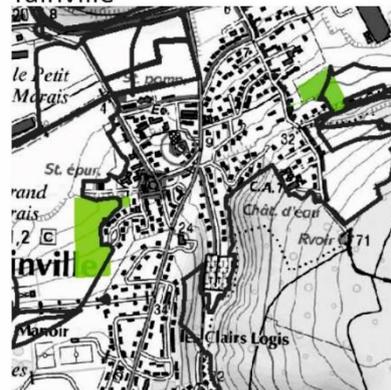
Le Trait



Le Trait



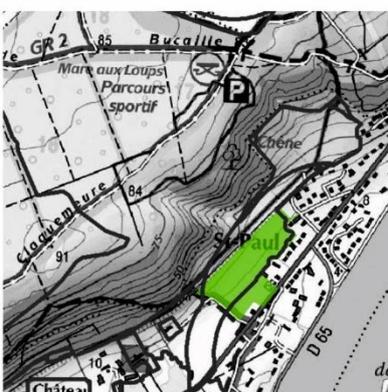
Yainville



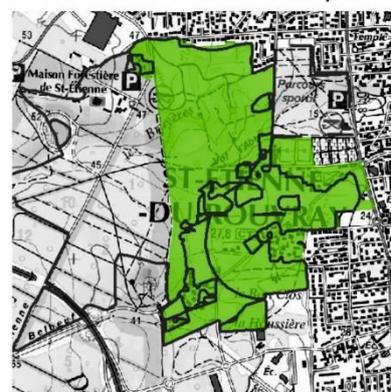
Jumièges



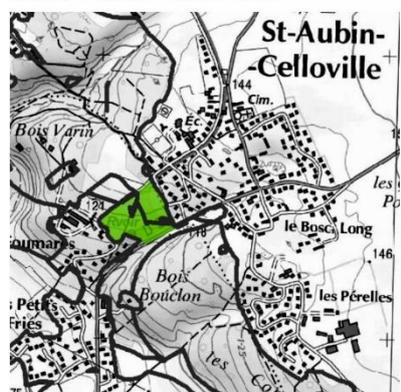
Duclair



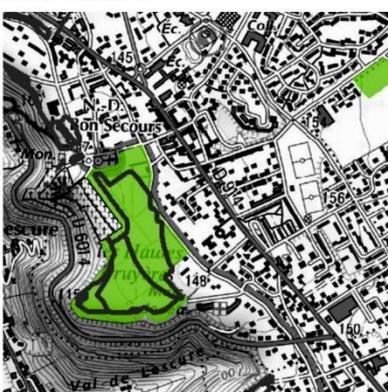
Saint-Etienne-du-Rouvray



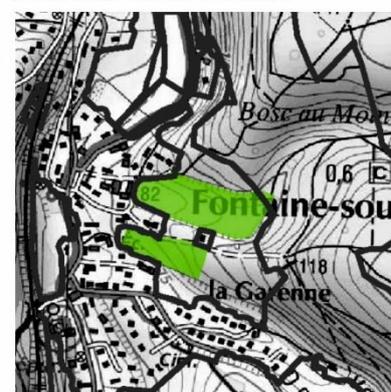
Saint-Aubin-Celloville



Bonsecours



Fontaine-sous-Préaux



**Réservoir de biodiversité des sols en zone AU (MUSE)**

- 4 : Assez élevé
- 5 : Élevé

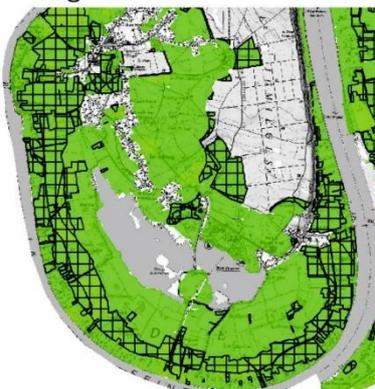
Couloir de biodiversité (TVB)

Fig. 177 : Secteurs en zones AU caractérisés par un bon réservoir de biodiversité selon MUSE associés aux couloirs de biodiversité de la TVB

Yainville



Jumièges/ Le Mesnil-sous-Jumièges



Henouville/ St-Martin-de-Boscherville



Yville-sur-Seine



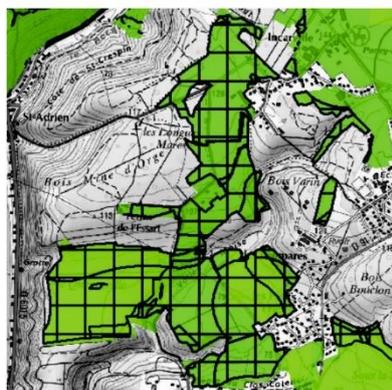
St-Pierre-de-Manneville



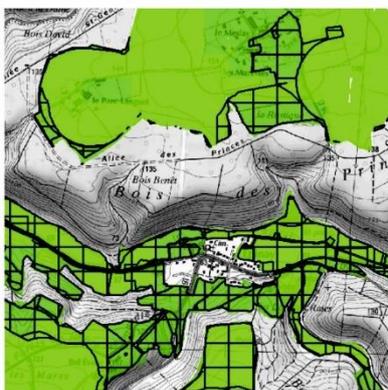
Quevillon



Gouy



St-Aubin-Epinay



Malaunay



#### Réservoir de biodiversité des sols (MUSE)

 4 : Assez élevé

 5 : Élevé

 Couloir de biodiversité (TVB)

Fig. 178 : Secteurs caractérisés par un bon réservoir de biodiversité selon MUSE associés aux couloirs de biodiversité de la TVB

### 3.4. Les zones UP et URP présentent-elles des réservoirs de biodiversité des sols favorables à la biodiversité des milieux ?

Les UP et URP désignent des types de zones ou secteurs avec des règles spécifiques d'utilisation et de construction. Les zones UP correspondent aux zones de parcs urbains ayant une attractivité à l'échelle intercommunale. Les URP sont des secteurs de renouvellement urbain. Ces zones sont cruciales pour un développement durable des territoires et leurs adaptations aux besoins de la population. Elles permettent de concilier différents enjeux tels que l'aménagement du territoire, la préservation de l'environnement, le développement économique et la qualité de vie des habitants.

Les prospections pédologiques dans les parties végétalisées des 11 sites tests UP et URP ont montré qu'il était possible de caractériser les sols et leurs fonctionnalités dans ce type de contexte. Ces données peuvent ouvrir de nouvelles perspectives de renouvellement urbain et protection de l'environnement. Le tableau ci-dessous indique que les sols des zones tests à réservoir de biodiversité assez élevé et élevé couvrent une surface de 110 ha, soit 80% de la superficie totale étudiée (cf. Fig.179).

Si ce % est bien inférieur à ce que l'on observe en zones A et N, il est comparable à celui déjà important des zones AU (82%). Souvent associées à des contextes de forte anthropisation et artificialisation, la démarche exploratoire de reconnaissance des sols menée sur les 11 sites tests souligne de manière convaincante le potentiel fonctionnel de biodiversité des zones UP et URP sur la métropole rouennaise. Ces premiers résultats mériteraient d'être confortés dans le cadre d'une étude des sols appliquée à l'ensemble de ces secteurs spécifiques.

		Zones UP/URP	
		Réservoir Biodiv. du sol	
Valeurs	Qualificatifs	Ha	%
1 (0)	Faible	5	3,3
2	Assez Faible	0	0,0
3	Moyenne	23	16,7
4	Assez élevée	105	76,3
5	Élevée	5	3,7
		137	100,0

Fig. 179 : Surfaces UP et URP associées aux valeurs de la fonction de réservoir de biodiversité du sol

### 3.5. Où trouve-t-on les réservoirs de carbone des sols les plus importants ?

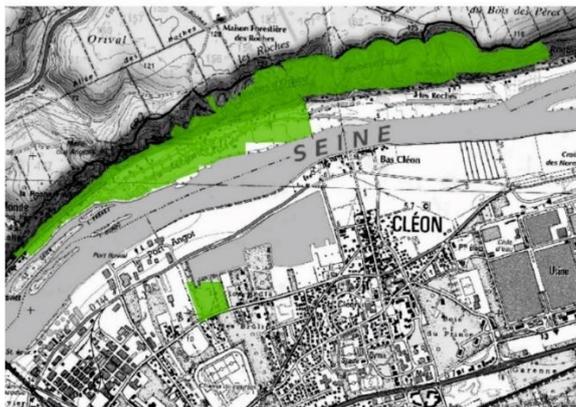
Un premier cadrage a été apporté précédemment lors de la présentation des résultats à l'échelle de la métropole qui a révélé une capacité limitée du territoire à stocker du carbone. Seuls 3% des zones A, N, AU et UP/URP étudiées témoignent d'une fonction réservoir de carbone assez élevée ou élevée. Toutefois, il faut rappeler que les zones AU et UP/URP se distinguent nettement des zones agricoles et naturelles. Celles-ci témoignent d'une proportion importante de surfaces à capacité de stockage carbone assez élevée (75% de la superficie totale en zone AU et 80% en zone UP/URP). Les documents suivants permettent de localiser les communes pour lesquelles la fonction de réservoir de carbone est la plus élevée.

En zone A et N, il s'agit des 3 secteurs regroupant les communes de Orival/Oissel/Cléon, Amfreville-la-Mi-Voie/Bonsecours et de Darnetal/Saint-Léger-du-Bourg-Denis (cf. Fig.180).

En zone AU, les contextes favorables au stockage du carbone dans les sols sont plus nombreux (cf. Fig.181). Ils concernent les communes suivantes : Le Trait, Duclair, Moulineaux, Grand-Couronne, Oissel, Saint-Etienne-du-Rouvray, Boos et Bois-Guillaume. Ces secteurs mériteraient d'être préserver de l'urbanisation.

En zone UP/URP, à l'exception des URP 12 (Caudebec-les-Elbeuf) et URP 14 (Elbeuf), tous les sites tests sont marqués par des sols à bon réservoir de carbone (cf. Fig.182). Ce constat vient renforcer nos conclusions sur les services écosystémiques que peuvent rendre ces secteurs spécifiques en soutenant la biodiversité des milieux et en contribuant à la résilience du territoire métropolitain face au dérèglement climatique.

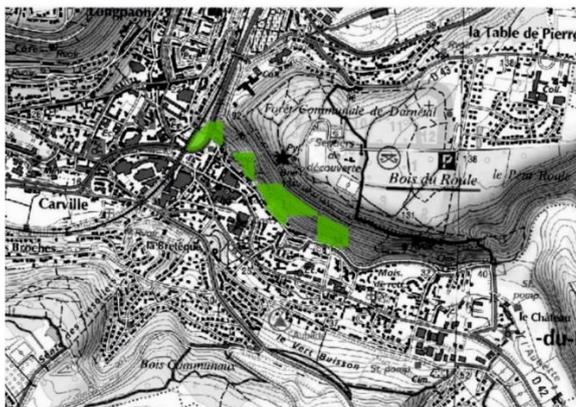
#### Orival/Oissel/Cléon



#### Amfreville-la-Mi-Voie/ Bonsecours



#### Darnetal/ St-Léger-du-Bourg-Denis



Réservoir de carbone (zones A et N)

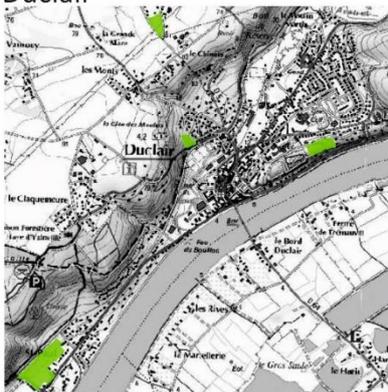
Élevé

Fig. 180 : Secteurs en zones A et N caractérisés par un bon réservoir de carbone

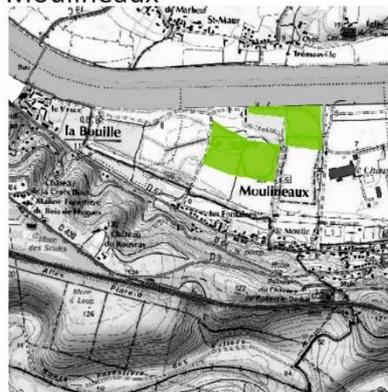
Le Trait



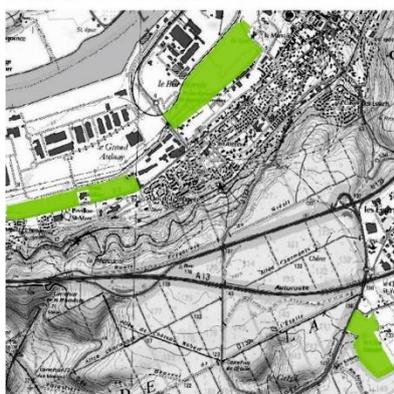
Duclair



Moulineaux



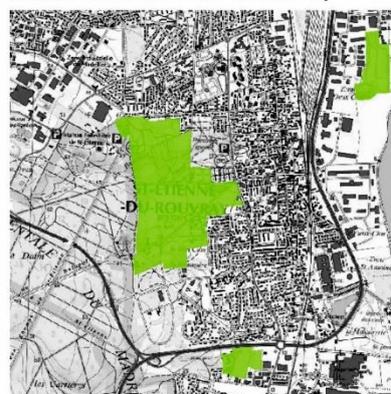
Grand-Couronne



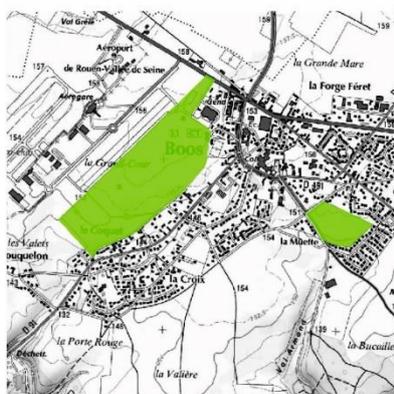
Oissel



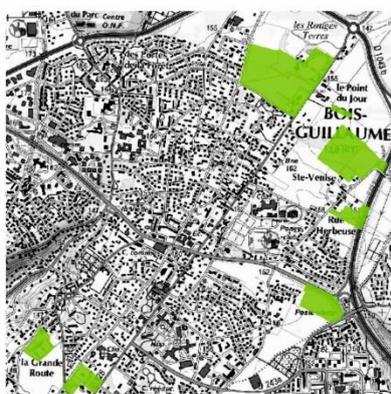
Saint-Etienne-du-Rouvray



Boos



Bois-Guillaume



Réservoir de carbone  
(zones AU)

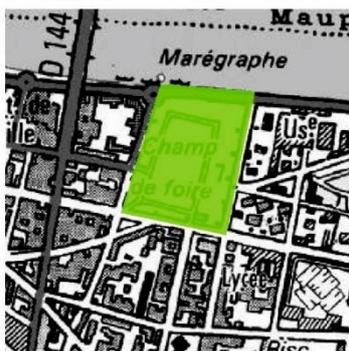
 Assez élevé

Fig. 181 : Secteurs en zones AU caractérisés par un bon réservoir de carbone

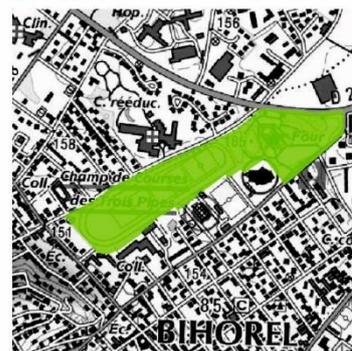
UP Jumièges



UP Elbeuf



UP Bihorel



URP 3 (Cléon/St-Aubin-les-Elbeuf) URP 5 (La Bouille)



URP 6 (La Londe)



URP 9 (Oissel)



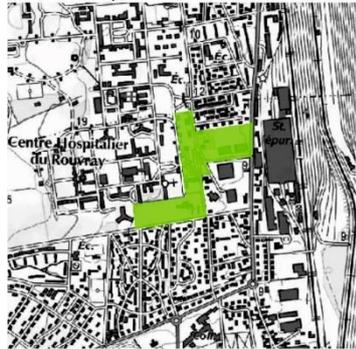
URP 12 (Caudebec-les-Elbeuf)



URP 14 (Elbeuf)



URP 29 (St-Etienne-du-Rouvray)



URP 32 (Canteleu)



Réservoir de carbone (zones UP/URP)

- Faible
- Moyen
- Assez élevé
- Elevé

Fig. 182 : Réservoir de carbone en zone UP/URP

### 3.6. Peut-on circonscrire les territoires à forte multifonctionnalité des sols ?

La représentation spatiale de la multifonctionnalité des sols sur le territoire de la MRN a déjà fait l'objet d'une présentation dans la partie consacrée aux résultats de l'application MUSE. Le tableau ci-dessous rappelle la part respective des surfaces selon les valeurs de multifonctionnalité, toutes zones confondues (cf. Fig.183).

Les secteurs à bon niveau de multifonctionnalité des sols couvrent une superficie importante de plus de 14 500 ha. C'est la raison pour laquelle il est difficile d'envisager une approche territorialisée de ces résultats plus fine que celle retenue précédemment. Toutefois, elle peut être enrichie au sujet de l'impact environnemental de l'urbanisation des zones AU ou de la densification des zones UP/URP.

		MUSE	
Valeurs	Qualificatifs	Ha	%
1	Faible	4,6	0,02
2	Assez Faible	345	1,5
3	Moyenne	8 690	36,9
4	Assez élevée	13 811	58,6
5	Élevée	725	3,1
		<b>23 575</b>	<b>100,0</b>

Fig. 183 : Surfaces toutes zones confondues associées aux valeurs de la multifonctionnalité des sols

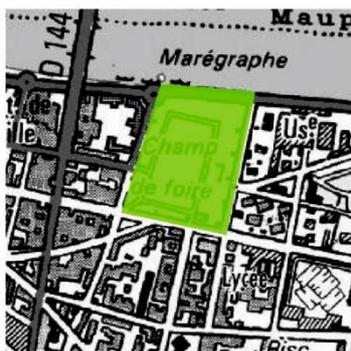
**Pour les zones AU, nous avons indiqué que 7 ha sur 10 attestent d'une forte multifonctionnalité.** Ces surfaces portent des fonctions économiques, environnementales et sociétales indéniables qu'il convient de préserver de l'urbanisation autant que possible dans les arbitrages en matière d'aménagement du territoire. Nous ne listerons pas les territoires concernés tant les situations sont nombreuses, la base de données qui accompagne ces résultats peut facilement être mobilisée localement pour faire ressortir la multifonctionnalité des zones AU.

Pour les 11 sites tests en zones UP et URP, les niveaux de multifonctionnalité des sols sont présentés ci-dessous (cf. Fig.184). On note une nette majorité de sites dotés d'une multifonctionnalité assez élevée (8 sur 11). Seules les URP 6 (La Londe) et 14 (Elbeuf) témoignent d'un niveau moyen et l'URP 12 (Caudebec-les-Elbeuf) d'un niveau faible. Dans les cas les plus favorables, il paraît légitime de se poser la question de la préservation des sites d'une densification urbaine.

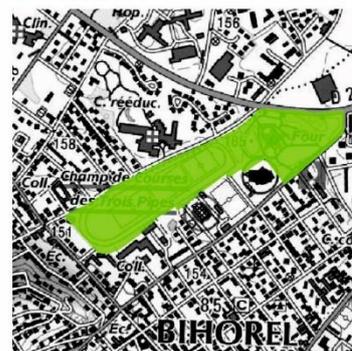
UP Jumièges



UP Elbeuf



UP Bihorel



URP 3 (Cléon/St-Aubin-les-Elbeuf)



URP 5 (La Bouille)



URP 6 (La Londe)



URP 9 (Oissel)



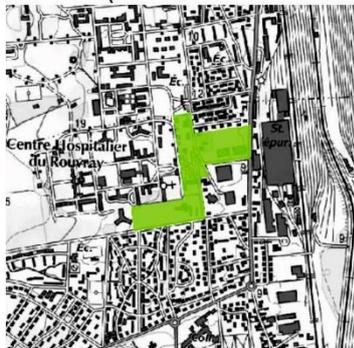
URP 12 (Caudebec-les-Elbeuf)



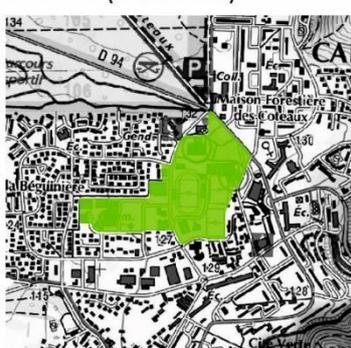
URP 14 (Elbeuf)



URP 29 (St-Etienne-du-Rouvray)



URP 32 (Canteleu)



**Multifonctionnalité des sols (MUSE)**

- Faible
- Assez faible
- Moyenne
- Assez élevée
- Elevée

Fig. 184 : Multifonctionnalité des sols pour les 11 sites UP et URP

### 3.7. De la fonction de régulation du cycle de l'eau au zonage d'eaux pluviales.

Le zonage d'eaux pluviales désigne une planification spatiale et une gestion spécifique des eaux de pluie dans une zone donnée. Il est souvent utilisé dans le cadre de la gestion urbaine et environnementale pour minimiser les impacts négatifs des précipitations sur les infrastructures et les écosystèmes. Ce zonage permet d'identifier les zones où les eaux pluviales seront collectées et évacuées. Il met en place des mesures pour traiter les eaux pluviales avant qu'elles ne rejoignent les cours d'eau naturels. Il localise et vise la protection des zones vulnérables aux inondations par des solutions d'ingénierie (digues, barrages, etc.) ou des solutions naturelles (zones humides, espaces verts). Ce zonage a également pour objectif de favoriser l'infiltration des eaux pluviales dans le sol pour recharger les nappes phréatiques et de soutenir les stratégies de conservation de la biodiversité tournées vers la création de zones de rétention végétalisées ou de corridors écologiques. Enfin, ce document de planification promeut des règles et des zones spécifiques où des pratiques particulières de gestion des eaux pluviales doivent être appliquées, en fonction des caractéristiques géographiques, hydrologiques et urbaines des secteurs.

Dans ce contexte, et compte tenu des caractéristiques méthodologiques sur lesquelles repose la détermination de la fonction de régulation du cycle de l'eau des sols selon MUSE, il semble pertinent de vouloir s'appuyer sur cette fonction pour conforter ou amender le zonage eaux pluviales dont la finalité est de réduire les risques d'inondation, de protéger la qualité de l'eau et d'intégrer les eaux pluviales dans une gestion durable de l'environnement urbain et rural.

Le document ci-dessous permet de comparer sur un même secteur délimité par les communes de Sahurs, Petit-Couronne, Saint-Pierre-les Elbeuf et Elbeuf, les capacités d'infiltration des eaux pluviales issues du zonage et les niveaux de régulation du cycle de l'eau selon MUSE (cf. Fig.185). On observe indéniablement une corrélation entre les deux extraits cartographiques qui montrent que là où la capacité d'infiltration s'améliore, la fonction de régulation du cycle de l'eau est assez élevée ou élevée et que celle-ci est moyenne sur les territoires marqués par une faible capacité d'infiltration. Ces premiers éléments laissent à penser que la méthodologie déployée pour élaborer le zonage d'eaux pluviales pourrait gagner en robustesse par intégration de tout ou partie des paramètres d'entrée mobilisés pour déterminer la fonction de régulation du cycle de l'eau des sols de la métropole.

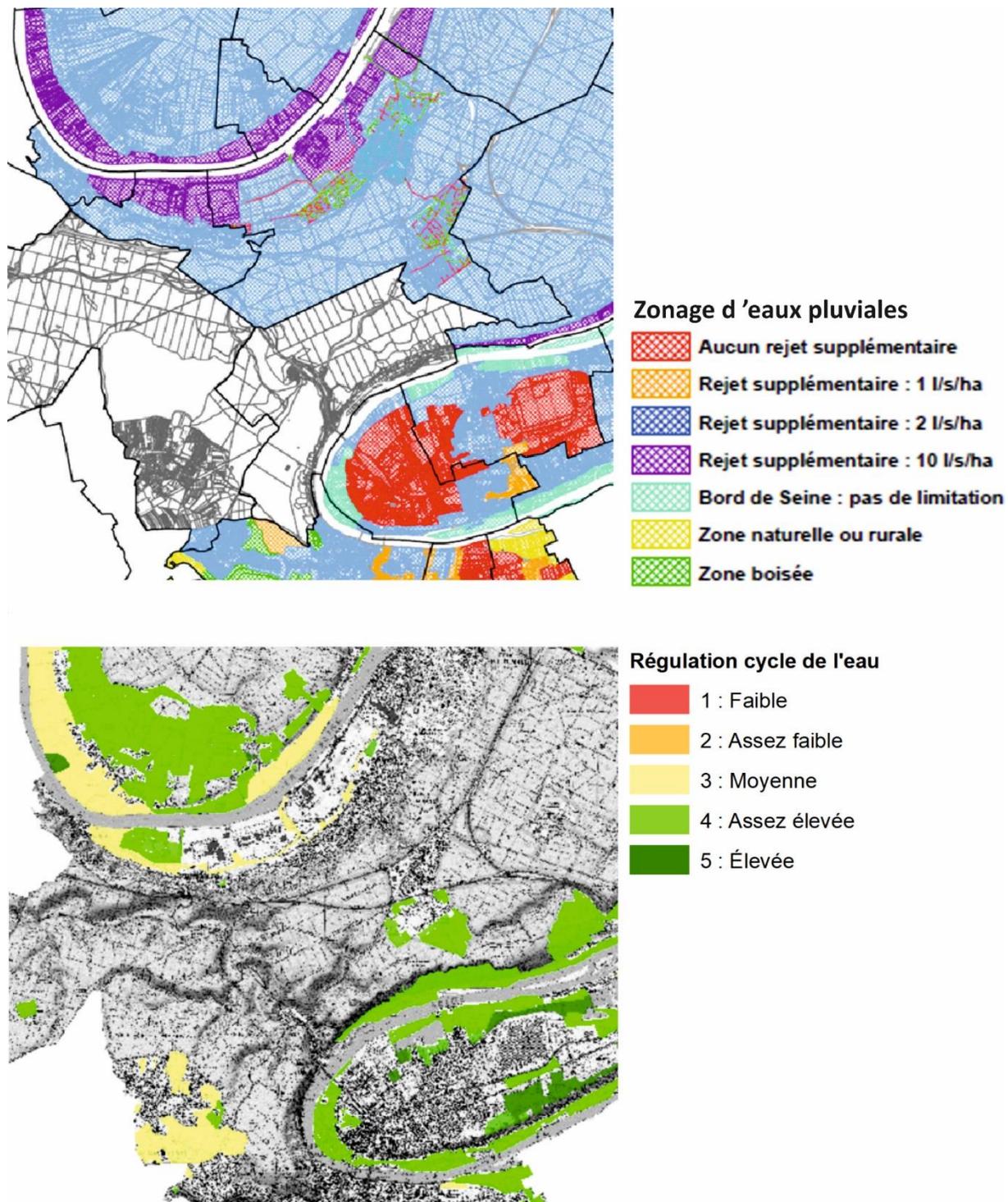


Fig. 185 : Capacités d'infiltration des eaux pluviales issues du zonage et niveaux de régulation du cycle de l'eau selon MUSE

# Conclusion

La prise en compte des sols est cruciale dans la planification et la gestion durable des espaces urbains et ruraux. Comprendre leurs caractéristiques permet d'optimiser l'utilisation des terres pour l'agriculture, le développement de l'urbanisme ou bien encore les programmes de conservation de la biodiversité. L'évaluation de la qualité des sols est tout aussi essentielle pour déterminer leur capacité à produire de la biomasse alimentaire et non alimentaire, pour réguler le cycle de l'eau, pour stocker le carbone et pour soutenir les composantes écologiques des milieux. Les enjeux territoriaux nécessitant de recourir à la connaissance des sols sont nombreux. Ils visent la préservation et la reconquête de la qualité de la ressource en eau, la résilience des espaces naturels et anthropisés face aux impacts du changement climatique et la gestion de la croissance des zones urbaines pour limiter l'étalement urbain.

Cette prise de conscience de l'importance de connaître les sols et leurs fonctions écologiques est la raison pour laquelle la Métropole Rouen Normandie a souhaité disposer de son propre Référentiel Sol. Il est le résultat d'une succession d'étapes, depuis les demandes d'autorisation d'accès aux parcelles et les campagnes de sondages à la tarière jusqu'à la construction des couches graphiques et sémantiques relatives aux Unités Cartographiques de Sol. 56 Unités Cartographiques de Sol ont été recensées. Elles expriment tous les types de pédogenèse des milieux tempérés à influence océanique, le caractère alluvial et colluvial des matériaux géologiques du territoire et l'impact de l'homme sur la transformation des profils initiaux. Cette diversité de profils pédologiques légitime la volonté de la Métropole de connaître ses sols pour orienter la planification urbaine car chaque type de sol est associé à des propriétés, des fonctions et des services écosystémiques spécifiques qu'il convient de prendre en compte pour mieux répondre localement aux enjeux de développement durable. Cette richesse pédologique justifie également le choix d'inventorier et de cartographier les sols à des échelles propres au fonctionnement de l'intercommunalité (1/10 000 et 1/50 000) pour à la fois mieux cerner la complexité des logiques de distribution des sols dans l'espace - donc de mieux connaître cette ressource naturelle - et de disposer de données nouvelles pour accompagner la Métropole vers le ZAN.

En premier lieu, le Référentiel Sol a été mobilisé pour renforcer les contributions écologiques, économiques et sociales de l'agriculture dans la gestion du territoire. La détermination et la représentation cartographique des potentialités agronomiques selon 3 scénarios de production agricole (conventionnel, maraîchage et élevage) a montré que la Métropole dispose de surfaces importantes caractérisées par des potentialités élevées quel que soit le système de production agricole envisagé. C'est le système maraîchage qui semble le mieux adapté aux sols du territoire, à la fois en zone A, AU et UP/URP du PLUi. Toutefois, il faut souligner que les sols offrent une très bonne prédisposition à l'agriculture d'élevage en zone A et N, prédisposition même légèrement supérieure à celle estimée pour l'agriculture conventionnelle. De ce fait, les données de la présente étude montrent que les sols métropolitains sont un véritable atout pour développer une économie agricole locale autour d'une ceinture maraîchère, pour renforcer la résilience de l'agriculture face aux changements climatiques et pour permettre aux acteurs agricoles de s'impliquer plus encore dans une démarche de gestion durable des territoires autour de pratiques agricoles préservant les ressources naturelles et les réservoirs de biodiversité.

Le recours à une approche intégrée et durable de la gestion agricole pour garantir un équilibre vertueux des territoires à long terme est renforcée par le Référentiel Sol à propos de la sensibilité du territoire métropolitain à l'aléa et au risque d'érosion hydrique. L'étude révèle que cette sensibilité dépend moins du contexte topo-climatique que des propriétés édaphiques à l'origine d'une prédisposition intrinsèque des sols à se dégrader sous l'effet de l'érosivité pluviale. Celle-ci peut être

exacerbée par des pratiques agricoles qui favorisent le tassement du sol ou l'appauvrissement de leur teneur en matière organique mais elle peut être aussi atténuée par des pratiques et des orientations de production conservatrices. Compte tenu des conséquences préjudiciables pour la biodiversité, les masses d'eau superficielles et souterraines, la résilience des sols au réchauffement climatique (perte de capacité de stockage carbone des sols) et pour les infrastructures collectives et individuelles (réseaux, bâtiments, habitations), il est essentiel que la profession agricole prenne pleinement conscience de son rôle majeur dans la protection des sols et donc du territoire.

Le Référentiel Sol permet également à la Métropole de disposer désormais d'une cartographie de la multifonctionnalité des sols à des échelles harmonisées sur l'ensemble de son territoire (1/50 000 pour les zones A et N et 1/10 000 pour les zones AU et les 11 sites tests UP/URP). Il ressort de cette nouvelle couche d'informations deux constats : (1) 60% des surfaces étudiées de l'intercommunalité sont marquées par une multifonctionnalité assez élevée et élevée, (2) la présence importante de surfaces à la multifonctionnalité moyenne (classe 3) ne permet pas de se positionner en matière de planification territoriale. Une désagrégation de cette classe doit être réalisée pour extraire les secteurs pour lesquels certaines des 4 fonctions initiales de MUSE doivent être considérées avec attention en raison de leur efficacité. Cette démarche est aussi nécessaire pour préciser la capacité fonctionnelle « intermédiaire » des sols en milieu urbain qui couvre 75% de la superficie totale de la couche végétale urbaine. Dans une gestion à moyen et long terme des enjeux territoriaux parmi lesquels celui visant la bonne application de la trajectoire du ZAN, les données de la multifonctionnalité des sols issues de l'étude revêtent un caractère particulièrement stratégique concernant les aspects quantitatifs et qualitatifs du cycle de l'eau, la protection et la restauration de la biodiversité (TVBB) ou bien encore l'adaptation au dérèglement climatique.

L'étude montre enfin que ce Référentiel Sol apporte un argumentaire étayé en matière d'analyse territoriale.

Sa contribution est essentielle pour mettre en perspective les données relatives aux potentialités agronomiques. Ainsi, il contribue à préciser les conditions de développement optimales du maraîchage pour protéger la ressource en eau. Il permet d'identifier les zones de développement ou du maintien de l'élevage sur des secteurs jugés comme vulnérables par la stratégie foncière eau. Il apporte des réponses ciblées géographiquement pour préserver de l'urbanisation les bonnes terres agricoles en zone AU ou pour promouvoir une agriculture urbaine en zones UP et URP. Il fournit enfin des éléments prédictifs sur l'évolution du potentiel agronomique des sols avec le changement climatique.

Le Référentiel Sol est tout aussi important pour circonscrire sur le territoire les enjeux liés à l'aléa érosion hydrique. Dorénavant, les secteurs à aléa assez fort sont connus, tout comme pour le risque théorique et réel d'érosion hydrique impliquant des zones urbaines ou à urbaniser. En argumentant sur le maintien ou l'amélioration du potentiel agronomique en cas de basculement d'un système agricole conventionnel vers un système maraîcher ou un système élevage, la base de données Sol géolocalise des formes d'agriculture alternatives pour réduire ou stopper la pression érosive sur les milieux et atténuer la vulnérabilité de la ressource en eau. Elle peut être enfin mobilisée pour répertorier les captages AEP caractérisés par un aléa érosion hydrique assez fort en connexion hydraulique avec des bêttoires dont on sait qu'elles constituent des voies préférentielles de transfert des polluants vers les eaux souterraines. Dans ce cadre, la localisation précise des points de connexion entre aléa et bêttoire oriente la prise de décision pour engager des actions préventives.

Enfin, la définition des fonctions et de la multifonctionnalité des sols à partir des données Sol de la Métropole fournit de nouveaux éléments pour répondre aux enjeux environnementaux. Ces données ont servi par exemple à cerner les zones AU dont la fonction de régulation du cycle de l'eau apparaît comme un levier pour préserver la ressource en eau, zones qu'il convient à ce titre de ne pas urbaniser. Elles posent aussi les bases d'une réflexion sur la prise en compte de cette fonction dans la

consolidation du zonage des eaux pluviales de la Métropole. Au regard des modalités de valorisation des sols souvent liées aux propriétés édaphiques, les secteurs à fonction de réservoir de biodiversité des sols élevée ont permis de conforter la délimitation des réservoirs de biodiversité et des corridors écologiques de la TVB de 2015 ou de constater que les zones UP et URP étudiées sont caractérisées par des réservoirs de biodiversité des sols favorables à la biodiversité des milieux.

La présente étude démontre effectivement l'importance stratégique de disposer de connaissances sur les sols pour apporter des éclairages nouveaux en matière de planification durable des territoires. Elle ouvre également des perspectives de développement de travaux autour de la caractérisation systématique des sols en milieu urbain (zones UP/URP), de l'appréciation de leur capacité et de leur continuité fonctionnelle dans la couverture végétale urbaine (trame brune) et autour de l'impact du réchauffement climatique sur les potentialités agronomiques des sols selon le scénario RCP 8.5 du GIEC et des projections à moyen et long terme.

## Références bibliographiques

- ADHIKARI K., HARTEMINK A. E., 2016. Linking soils to ecosystem services. A global review, *Geoderma*, Volume 262, 15 January 2016, pp. 101-111
- BAIZE D., 2000. Guide des analyses en pédologie, Ed INRA, 257 p
- BAIZE D., 2023. La formation des sols sous climats tempérés, *Encyclopédie de l'Environnement*, ISSN 2555-0950
- BAIZE D., DUVAL O., RICHARD G., 2013. Les sols et leurs structures. Observations à différentes échelles, *Quae*, 264 p
- BAIZE D., GIRARD M.C., 2009. Référentiel pédologique 2008, *Quae*, 405 p
- BAIZE D., JABIOL B., 2011. Guide pour la description des sols, Editions Quae, 429 p
- BOULAIN J., 1989. Histoire des pédologues et de la science des Sols, éditions INRA, 285 p
- BRANCHU P., MARSEILLE F., BECHET B., BESSIERE J.-P., BOITHIAS L., DUVIGNEAU C., GENESCO P., KELLER C., LAMBERT M.-L., LAROCHE B., LE GUERN C., LEMOT A., METOIS R., MOULIN J., NEEL C., SHERIFF R., 2022. MUSE. Intégrer la multifonctionnalité dans les documents d'urbanisme, *ADEME* 184 p
- BRUCKERT S., 1989. Désignation et classement des sols agricoles d'après des critères de situation et d'organisation : application aux terres franc-comtoises du domaine climatique tempéré semicontinental, *Agronomie*, 1989, pp.353-361
- BRUCKLER L., STENGEL P., BALESSENT J., 2009. Le sol, *Dossier INRA*, 183 p
- DEPRET Y., BARDY M., SCHNEBELEN N., CLARIMONT B., ODDO B., 2013. Qualification des espaces agricoles et naturels consommés ou susceptibles de l'être. Aptitude agronomique et écologique des sols. Mesure de la consommation d'espace à partir des fichiers fonciers, *CERTU*. Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables, 208 p
- DERRIEN D., DIGNAC M.F., BASILE-DOELSCH I., BAROT S., CECILLON L., CHENU C., CHEVALLIER T., FRESCHET G.T., GARNIER P., GUENET B., HEDDE M., KLUMPP K., LASHERMES G., MARON P.A. NUNAN N., ROUMET C., BARRE P., 2016. Stocker du C dans les sols : Quels mécanismes, quelles pratiques agricoles, quels indicateurs ? *Étude et Gestion des Sols*, Volume 23, pp. 193-223
- DUCHAUFOR P., FAIVRE P., POULENARD J., GURY M., 2020. Introduction à la science du sol. Sol, végétation, environnement, *Dunod*, 464 p
- ESCADAFAL R., GIRARD M.C., COURAULT C., 1988. La couleur des sols : appréciation, mesure et relations avec les propriétés spectrales, *Agronomie*, 1988, 8 (2), pp.147-154
- GIRARD M.C., SCHVARTZ C., JABIOL B., 2023. *Étude des sols*, *Dunod*, 410 p
- GRAS R., 2006. Sols caillouteux et production végétale, *INFRA Editions*, 180 p
- GROLEAU E., BARGEOT L., CHAFCHAFI A., HARDY R., DOUX J. BEAUDOU A. LE MARTRET H., LACASSIN J.C., FORT J.L., FALIPOU P. ARROUAYS D., 2004. Le système d'information national sur les sols : DONESOL et les outils associés, *Étude et Gestion des Sols*, pp.255-269
- JEFFERY S., GARDI C., JONES A., MONTANARELLA L., MARMO L., K. RITZ M., PERES G., ROMBKE J., DER PUTTEN W.H., 2010. Atlas européen de la biodiversité du sol, Commission européenne, Bureau des publications de l'Union européenne, Luxembourg, 128 p
- KARIMI B., CHEMIDLIN PRÉVOST-BOURÉ N., DEQUIEDT S., TERRAT S. & RANJARD L., 2018. Atlas français des bactéries du sol. Muséum national d'Histoire naturelle, Paris ; *Biotope*, Mèze, 192 p

- 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, SSSA, Volume 61, Issue1, pp. 4-10
- LAROCHE B., LE BAS C., 2014. Les programmes d'inventaire cartographique : IGCS, BDGSF, Séminaire du Département Environnement et Agronomie "Les Bases de données SOL", 40 p
- LE GOUÉE P., 2024. Carte des sols de Normandie issue de l'harmonisation des RRP Basse-Normandie et Haute-Normandie, Profil environnemental Sol, DREAL de Normandie (à paraître)
- LE GOUÉE P., 2017. Mesurer l'impact de l'urbanisation des sols et ses effets sur l'agriculture et l'environnement, Les cartes et les données pédologiques. Des outils au service des territoires., Educagri, 2017, 979-10-275-0099-4. ISBN 979-10-275-0099-4 <hal-01521618>
- LE GOUÉE P., CANTAT O., BENSALD A., GOULET A., DELAHAYE D., 2011. Scales: An Original Model to Diagnose Soil Erosion Hazard and Assess the Impact of Climate Change on Its Evolution. Chapter 12, Soil Erosion Studies. InTech Publisher, ISBN 978-953-307-710-9, pp. 227-252
- LE GOUÉE P., DELAHAYE D., BERMOND M., MARIE M., DOUVINET J., VIEL V., 2010. SCALES: a large-scale assessment model of soil erosion hazard in Basse-Normandie (Northern-Western France), Earth Surface Processes and Landforms, 35, 8, 30, pp. 887–901
- LEGROS J.P., 1996. Cartographies des sols. De l'analyse spatiale à la gestion des territoires, Presses polytechniques et universitaires romandes, 370 p
- LEMANCEAU P., 2020. La biodiversité des sols : un fantastique patrimoine à préserver et valoriser par les services écosystémiques. Les services écosystémiques dans les espaces agricoles. Paroles de chercheur(e)s, 156 p., 0.15454/nwq9-zk60\_book\_ch0\_hal-02503300
- MEDDE, GIS Sol, 2013. Guide pour l'identification et la délimitation des sols de zones humides, Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, Groupement d'Intérêt Scientifique Sol, 63 p
- PANAGOS P., BALLABIO C., HIMICS M., SCARPA S., MATTHEWS F., BOGONOS M., POESEN J., BORRELLI P., 2021. Projections of soil loss by water erosion in Europe by 2050, Environmental Science & Policy., Vol. 124, pp. 380-392
- PANSU M., GAUTHEYROU J., LOYER J.Y. ? 1998. L'analyse du sol : échantillonnage, instrumentation et contrôle, Masson, 497 p
- PEREZ L., GOURDON A., CHENU C., COZZI T., DUPARQUE A., et al., 2019. Aldo, a simple tool providing default estimates of carbon sequestration in soils, vegetation and wood products for territorial climate policies, Food security and climate change: 4 per 1000 initiative new tangible global challenges for the soil, Jun 2019, Poitiers
- SANDERS L., 2001. Modèles en analyse spatiale : introduction, Hermes-Lavoisier, pp.17-29
- TOTH B., WEYNANTS, M., NEMES A., MAKÓ A., BILAS G., TOTH G., 2015. New generation of hydraulic pedotransfer functions for Europe, European Journal of Soil Science, 66, 226–238
- WALTER C., Bispo A., CHENU C., LANGLAIS A., SCHWARTZ C., 2015. Les services écosystémiques des sols : du concept à sa valorisation, Cahiers Demeter, 15, pp. 53-68

# Annexe 1

## Saisie de l'environnement du profil

STIPA 2000 - U.F.R. Science du Sol - INRA Montpellier modifiée InfoSol 2006

N°profil <input type="text"/>		N°Etude <input type="text"/>		Auteur <input type="text"/>		Date <input type="text"/>	
GPS(WGS84) <input type="text"/>		Long.(L2e) <input type="text"/>		E Gensurface <input type="text"/>		Chargé d'étude <input type="text"/>	
Lat.(L2e) <input type="text"/>		N°INSEE <input type="text"/>		Profarrêt(cm) <input type="text"/>		Altitude(m) <input type="text"/>	
Causearrêt <input type="text"/>		nombrephotos <input type="text"/>		<b>Géologie</b>			
<b>Antécédents climatiques</b> Durée <input type="text"/> 1, lesjoursprécédents 2, lessemainesprécédentes  Nature <input type="text"/> 1, pluvieux 5, sec 2, neigeux 6, sécheresse 3, humide 7, gel 4, ensoleillé 8, venteux 9, variable  Intensité <input type="text"/> 1, faibleintensité 2, moyenneintensité 3, forteintensité		Organisation Géologique <input type="checkbox"/> 1, profilmonolithique <input type="checkbox"/> 2, profilbithique <input type="checkbox"/> 3, profilpolythique Nom(s) matériau(x) : 1 <input type="text"/> 2 <input type="text"/> 3 <input type="text"/>		<b>Hydrologie</b> Régime Hydrique <input type="checkbox"/> 1, saturé enpermanence 2, saturé chaquejour 3, saturé demanièresaisonnaire 4, humideenpermanence 5, secdemanièresaisonnaire 6, continuellementsec  Régime Submersion <input type="checkbox"/> 0, apparementjamaisubmergé 1, submergé demanièresaisonnaire 2, submergé chaquejour 3, submergé enpermanence  Excès d'eau <input type="text"/> 0, sansexcèsd'eau 1, nappeperchéetemporaire 2, imbibitioncapillaire 3, nappesouterrainelibre 4, nappesouterrainecaptive 5, submersion 6, résurgenceourceuseetources 7, stagnationdesurface  Excès de l'eau <input type="text"/> 1, surunebosse 2, dansuncreux 3, à mi, hauteurduversant 4, surunreplat  Origine excès eau <input type="text"/> 1, nonidentifiée 2, pluie 3, fontedesneiges 4, additiond'eaud'origineexterne 5, eauesentiellementd'origineexterne  Drainage naturel <input type="text"/> 1, excessif 5, faible 2, favorable 6, assezpauvre 3, modéré 7, pauvre 4, imparfait 8, trèspauvre 9, submergé  Niveau maxsupposé <input type="text"/> delanappe(cm)			
		<b>Végétation</b> <input type="text"/>  <b>Erosion</b> <input type="text"/> 0, niérosionbattance 1, battance 2, érosionennappe 3, érosionéolienne 4, érosionenrigoles(profondeur<25cm) 5, érosionenravines(profondeur>25cm) 6, dépôtsdematériauxfossiers(sables, graviers, cailloux,...) 7, dépôtsdematériauxxssins(limons, argiles)		Etage(s) géologique(s) : 1 <input type="text"/> 2 <input type="text"/> 3 <input type="text"/>  profondeur de la couche M, R ou D <input type="text"/> cm  Classe matériau <input type="text"/> 1, rochesmatériauxnonidentifiés 2, roches cristallinesgrenues 3, rochesvolcaniquesmassives 4, rochesvolcaniquespyroclastiques 5, rochesmétamorphiques 6, rochesédimentairescohérentesrichesen carbonateset/oumagnésis 7, rochesédimentairescohérentescalcaires 8, rochesédimentairescohérentessilico,alumineuses 9, roches salines 10, rochesphosphatées 11, rochesédimentairesferriquesetalumineuses 12, rochesédimentairescarbonées 13, rochesédimentairesmeubles 14, rochesédimentairesmeublescarbonatées 99, autres roches		<b>Geomorphologie</b> forme (codevoir glossaire) <input type="text"/> Pente (en %) <input type="text"/> Exposition <input type="text"/>  Situation / morphologie <input type="text"/> 1, surunebosse 2, dansuncreux 3, surunepenteirrégulière 4, surunreplat  Situation / versant <input type="text"/> 1, aubasduversant 2, autiersinférieurduversant 3, à mi, hauteurduversant 4, autierssupérieurduversant 5, ausommetduversant  Situation / plantation <input type="text"/> 1, entredouxrangées 2, surunrangée 3, présd'unarbre  Situation / parcelle <input type="text"/> 1, présdelalimiteparcelle 2, auctendrelaparcelle 3, enhauteurparcelle 4, aubasdelaparcelle	
N°DoneSol <input type="text"/>		1					

## Saisie des horizons du profil

STIPA 2000 - U.F.R. Science du Sol - INRA Montpellier modifiée InfoSol 2006

N°profil <input type="text"/>		N°Etude <input type="text"/>		Traces d'activités									
<b>Profondeurs (cm)</b> sommet base 1 <input type="text"/> <input type="text"/> 2 <input type="text"/> <input type="text"/> 3 <input type="text"/> <input type="text"/> 4 <input type="text"/> <input type="text"/> 5 <input type="text"/> <input type="text"/> 6 <input type="text"/> <input type="text"/> N°d'horizon		<b>Texture</b> 1 <input type="text"/> 2 <input type="text"/> 3 <input type="text"/> 4 <input type="text"/> 5 <input type="text"/> 6 <input type="text"/>		<b>Taille du sable</b> 1 <input type="text"/> 1, fin(0,05à 0,10mm) 2 <input type="text"/> 2, moyen(0,1à 0,2mm) 3 <input type="text"/> 3, grossier(0,2à 2mm) 4 <input type="text"/> 5 <input type="text"/> 6 <input type="text"/>		<b>Effervescence</b> Intensité (HC1/5) <input type="text"/> 1 <input type="text"/> 0, nulle 2 <input type="text"/> 1, faible 3 <input type="text"/> 2, modérée 4 <input type="text"/> 3, forte 5 <input type="text"/> 4, extrêmementforte Localisation <input type="text"/> 1 <input type="text"/> 1, généralisée 2 <input type="text"/> 2, localiséeà lamatrice 3 <input type="text"/> 3, localiséeausquette 4 <input type="text"/> 4, localiséeauxélémentssecondaires 5 <input type="text"/> 6 <input type="text"/>		<b>Abondance</b> 1 <input type="text"/> 0, absentes 2 <input type="text"/> 1, peuabundantes 3 <input type="text"/> 2, nombreuses 4 <input type="text"/> 3, trèsabundantes 5 <input type="text"/> 6 <input type="text"/>					
<b>Matières Organiques</b> Abondance <input type="text"/> 1 <input type="text"/> 0, absente 2 <input type="text"/> 1, indéterminée 3 <input type="text"/> 2, faible(<1%) 4 <input type="text"/> 3, moyenne(1≤...<4%) 5 <input type="text"/> 4, assezforte(4≤...<10%) 6 <input type="text"/> 5, forte(10≤...<20%) 7 <input type="text"/> 6, trèsforte(20≤...<30%) 8 <input type="text"/> 7, extrêmementforte(>30%)		Altération <input type="text"/> 1 <input type="text"/> 0, Nonaltérées 2 <input type="text"/> 1, faiblementaltérées 3 <input type="text"/> 2, altérées 4 <input type="text"/> 3, trèsaltérées		Fragmentation <input type="text"/> 1 <input type="text"/> 0, Nonfragmentées 2 <input type="text"/> 1, peufragmentées 3 <input type="text"/> 2, fragmentées 4 <input type="text"/> 3, trèsfragmentées 5 <input type="text"/> 4, restesvisibles		<b>Limites</b> épaisseur de la limite en cm <input type="text"/> 1 <input type="text"/> 2 <input type="text"/> 3 <input type="text"/> 4 <input type="text"/> 5 <input type="text"/> 6 <input type="text"/>		Régularité <input type="text"/> 1 <input type="text"/> 1, régulière 2 <input type="text"/> 2, ondulée 3 <input type="text"/> 3, irrégulièreougloussique 4 <input type="text"/> 4, interrompue					
<b>Structures</b> Type (A,B) <input type="text"/> 1 <input type="text"/> 0, Continuoumassive 2 <input type="text"/> 1, particulaire 3 <input type="text"/> 2, lamellaire 4 <input type="text"/> 3, squameuse 5 <input type="text"/> 4, prismatique 6 <input type="text"/> 5, encolonnes 7 <input type="text"/> 6, polyédrique 8, cubique 9, enplansobliques 10, enfuseaux 11, grenue 12, fluffy oumicrogrenue 13, grumoleuse 14, fibreuse 15, feuilletée 16, coprogène 17, polyédriquesubanguleuse 18, lithiqueoulithologique		Netteté (A,B) <input type="text"/> 1 <input type="text"/> 1, faible 2 <input type="text"/> 2, modérée 3 <input type="text"/> 3, forte		Relation entre Struct. (A et B) <input type="text"/> 1 <input type="text"/> 1, str.etsurstructure 2 <input type="text"/> 2, str.etsous.structure 3 <input type="text"/> 3, str.Juxtaposées 4 <input type="text"/> 4, str.Associéesoumêlées		Taille (A, B) (en mm) <input type="text"/> 1 <input type="text"/> <input type="text"/> 2 <input type="text"/> <input type="text"/> 3 <input type="text"/> <input type="text"/> 4 <input type="text"/> <input type="text"/> 5 <input type="text"/> <input type="text"/> 6 <input type="text"/> <input type="text"/>		<b>Humidité</b> 1 <input type="text"/> 1, sec 2 <input type="text"/> 2, frais 3 <input type="text"/> 3, humide 4 <input type="text"/> 4, trèshumide 5 <input type="text"/> 5, saturé 6 <input type="text"/> 6, noyé					
<b>Propriétés Mécaniques</b> Plasticité sitrshumide <input type="text"/> 1 <input type="text"/> 0, nonplastique 2 <input type="text"/> 1, peuplastique 3 <input type="text"/> 2, plastique 4 <input type="text"/> 3, trèsplastique		Adhésivité sihumide <input type="text"/> 1 <input type="text"/> 0, noncollant 2 <input type="text"/> 1, peucollant 3 <input type="text"/> 2, collant 4 <input type="text"/> 3, trèscollant		Fermeté sihumide <input type="text"/> 1 <input type="text"/> 0, pasdefermeté 2 <input type="text"/> 1, trèspeuferme 3 <input type="text"/> 2, peuferme 4 <input type="text"/> 3, ferme 5 <input type="text"/> 4, trèsferme 6 <input type="text"/> 5, extrêmementferme		Friabilité sifrais <input type="text"/> 1 <input type="text"/> 0, nonfriable 2 <input type="text"/> 1, peu friable 3 <input type="text"/> 2, friable 4 <input type="text"/> 3, trèsfriable		Fragilité sisec <input type="text"/> 1 <input type="text"/> 0, nonfragile 2 <input type="text"/> 1, peufragile 3 <input type="text"/> 2, fragile 4 <input type="text"/> 3, trèsfragile		Dureté sisec <input type="text"/> 1 <input type="text"/> 0, pasdedureté 2 <input type="text"/> 1, trèspeudur 3 <input type="text"/> 2, légèrementdur 4 <input type="text"/> 3, dur 5 <input type="text"/> 4, trèsdur 6 <input type="text"/> 5, extrêmementdur		Compacité <input type="text"/> 1 <input type="text"/> 1, meuble 2 <input type="text"/> 2, peucompact 3 <input type="text"/> 3, compact 4 <input type="text"/> 4, trèscompact	
2													

Saisie des horizons du profil

STIPA 2000 - U.F.R. Science du Sol - INRA Montpellier modifiée InfoSol 2006

N°profil  N°Etude  **Taches** A = Oxydation B = Réduction C = Dégradation ou autres \*

<b>Abondance en surface</b> (A, B et C) 1 <input type="checkbox"/> 0, pas de taches 2 <input type="checkbox"/> 1, très peu nombreuses (<2%) 3 <input type="checkbox"/> 2, peu nombreuses (2...<5%) 4 <input type="checkbox"/> 3, assez nombreuses (5...<15%) 5 <input type="checkbox"/> 4, nombreuses (15...<40%) 6 <input type="checkbox"/> 5, très nombreuses (40...<80%) 7 <input type="checkbox"/> 6, dominantes (≥80%)	<b>Dimension</b> (A, B et C) 1 <input type="checkbox"/> 1, extrêmement fines (<1mm) 2 <input type="checkbox"/> 2, très fines (1...<2mm) 3 <input type="checkbox"/> 3, fines (2...<6mm) 4 <input type="checkbox"/> 4, moyennes (6...<20mm) 5 <input type="checkbox"/> 5, grosses (20...<60mm) 6 <input type="checkbox"/> 6, très grosses (≥60mm)	<b>Netteté des limites</b> (A, B et C) 1 <input type="checkbox"/> 1, peunettes (>2mm) 2 <input type="checkbox"/> 2, nettes (0,5...<2mm) 3 <input type="checkbox"/> 3, très nettes (<0,5mm)	<b>Contraste</b> (A, B et C) 1 <input type="checkbox"/> 1, peu contrastées 2 <input type="checkbox"/> 2, contrastées 3 <input type="checkbox"/> 3, très contrastées	<b>Autres natures</b>
<b>Forme</b> (A, B et C) 1 <input type="checkbox"/> 1, irrégulières 2 <input type="checkbox"/> 2, arrondies 3 <input type="checkbox"/> 3, entraînées ou bandes horizontales 4 <input type="checkbox"/> 4, entraînées ou bandes verticales 5 <input type="checkbox"/> 5, entraînées ou bandes obliques 6 <input type="checkbox"/> 6, entraînées ou bandes orthogonales 7 <input type="checkbox"/> 7, entraînées ou quelconques	<b>Couleur</b> (A, B et C)	<b>Distribution</b> (A, B et C) 1 <input type="checkbox"/> 1, dans la matrice 2 <input type="checkbox"/> 2, sur les faces des agrégats 3 <input type="checkbox"/> 3, autour des spores 4 <input type="checkbox"/> 4, autour des racines 5 <input type="checkbox"/> 5, autour des éléments grossiers 6 <input type="checkbox"/> 6, en remplissage de fissures 7 <input type="checkbox"/> 7, sans relation avec les autres caractères	<b>Couleur de l'horizon</b> 1 <input type="text"/> 2 <input type="text"/> 3 <input type="text"/> 4 <input type="text"/> 5 <input type="text"/> 6 <input type="text"/>	
<b>Porosité Globale</b> 1 <input type="checkbox"/> 0, non identifiée 2 <input type="checkbox"/> 1, non poreux (<2%) 3 <input type="checkbox"/> 2, peu poreux (2...<5%) 4 <input type="checkbox"/> 3, moyennement poreux (5...<15%) 5 <input type="checkbox"/> 4, poreux (15...<40%) 6 <input type="checkbox"/> 5, très poreux (>40%)	<b>Pores de l'agrégat</b> 1 <input type="checkbox"/> Abondance 2 <input type="checkbox"/> 0, pas de pores visibles 3 <input type="checkbox"/> 1, peu nombreux (1...<50/dm <sup>2</sup> ) 4 <input type="checkbox"/> 2, assez nombreux (50...<200/dm <sup>2</sup> ) 5 <input type="checkbox"/> 3, nombreux (≥200/dm <sup>2</sup> ) 6 <input type="checkbox"/> Dimensions 1 <input type="checkbox"/> 1, très fins (d<0,5mm) 2 <input type="checkbox"/> 2, fins (0,5...<2mm) 3 <input type="checkbox"/> 3, moyens (2...<5mm) 4 <input type="checkbox"/> 4, larges (≥5mm)	<b>Fentes</b> 1 <input type="checkbox"/> Disposition 2 <input type="checkbox"/> 0, pas de fentes 3 <input type="checkbox"/> 1, débutant dans l'horizon 4 <input type="checkbox"/> 2, traversant l'horizon 5 <input type="checkbox"/> 3, se terminant dans l'horizon 6 <input type="checkbox"/> Largeur (en mm) 1 <input type="checkbox"/> 1, 2, 3, 4, 5, 6 2 <input type="checkbox"/> Epaisseur (en mm) 1 <input type="checkbox"/> 1, 2, 3, 4, 5, 6	<b>Faces</b> 1 <input type="checkbox"/> Aspect 2 <input type="checkbox"/> 0, pas de particularité 3 <input type="checkbox"/> 1, faces de glissement 4 <input type="checkbox"/> 2, revêtements bien individualisés 5 <input type="checkbox"/> 3, faces luisantes non identifiées 6 <input type="checkbox"/> Couleur 1 <input type="text"/> 2 <input type="text"/> 3 <input type="text"/> 4 <input type="text"/> 5 <input type="text"/> 6 <input type="text"/>	
<b>Revêtements</b> 1 <input type="checkbox"/> Nature (A et B) 2 <input type="checkbox"/> 0, pas de revêtements 3 <input type="checkbox"/> 1, non identifiés 4 <input type="checkbox"/> 2, argileux 5 <input type="checkbox"/> 3, argileux avec sesquioxydes 6 <input type="checkbox"/> 4, organo-argileux 7 <input type="checkbox"/> 5, autres types	1 <input type="checkbox"/> Localisation (A et B) 2 <input type="checkbox"/> 1, associés aux vides 3 <input type="checkbox"/> 2, associés aux agrégats 4 <input type="checkbox"/> 3, sur les faces horizontales 5 <input type="checkbox"/> 4, sur les faces verticales 6 <input type="checkbox"/> 5, sur les queues	1 <input type="checkbox"/> Recouvrement (A et B) 2 <input type="checkbox"/> 1, très peu nombreux (<5%) 3 <input type="checkbox"/> 2, peu nombreux (5...<25%) 4 <input type="checkbox"/> 3, nombreux (25...<50%) 5 <input type="checkbox"/> 4, très nombreux (50...<75%) 6 <input type="checkbox"/> 5, généralisés (≥75%)	1 <input type="checkbox"/> Epaisseur (A et B) 2 <input type="checkbox"/> 1, fins (<0,5mm) 3 <input type="checkbox"/> 2, moyens (0,5...<0,5mm) 4 <input type="checkbox"/> 3, épais (≥0,5mm)	
			<b>Salinité</b> 1 <input type="checkbox"/> 0, non salé (≤2 mS/cm) 2 <input type="checkbox"/> 1, légèrement salé (2...<4 mS/cm) 3 <input type="checkbox"/> 2, moyennement salé (4...<8 mS/cm) 4 <input type="checkbox"/> 3, salé (8...<16 mS/cm) 5 <input type="checkbox"/> 4, très salé (≥16 mS/cm)	

Saisie des horizons du profil

STIPA 2000 - U.F.R. Science du Sol - INRA Montpellier modifiée InfoSol 2006

N°profil  N°Etude

<b>Eléments secondaires</b> <b>Cristaux</b> 1 <input type="checkbox"/> Abondance en surface 2 <input type="checkbox"/> 0, pas de cristaux 3 <input type="checkbox"/> 1, très peu nombreux (<2%) 4 <input type="checkbox"/> 2, peu nombreux (2...<5%) 5 <input type="checkbox"/> 3, assez nombreux (5...<15%) 6 <input type="checkbox"/> 4, nombreux (15...<40%) 7 <input type="checkbox"/> 5, très nombreux (40...<80%) 8 <input type="checkbox"/> 6, dominants (≥80%)	1 <input type="checkbox"/> Dimensions 2 <input type="checkbox"/> 1, extrêmement fins (<1mm) 3 <input type="checkbox"/> 2, très fins (1...<2mm) 4 <input type="checkbox"/> 3, fins (2...<6mm) 5 <input type="checkbox"/> 4, moyens (6...<15mm) 6 <input type="checkbox"/> 5, gros (15...<60mm) 7 <input type="checkbox"/> 6, très gros (≥60mm)	1 <input type="checkbox"/> Nature 2 <input type="checkbox"/> 1, non identifiée 3 <input type="checkbox"/> 2, carbonate de calcium 4 <input type="checkbox"/> 3, gypse 5 <input type="checkbox"/> 4, NaCl 6 <input type="checkbox"/> 5, jarosite	<b>Conduits de vers</b> 1 <input type="checkbox"/> Densité 2 <input type="checkbox"/> 0, pas de conduits 3 <input type="checkbox"/> 1, peu nombreux 4 <input type="checkbox"/> 2, nombreux 5 <input type="checkbox"/> 3, très nombreux 6 <input type="checkbox"/> Orientation 1 <input type="checkbox"/> 1, verticale 2 <input type="checkbox"/> 2, horizontale 3 <input type="checkbox"/> 3, oblique 4 <input type="checkbox"/> 4, quelconque 5 <input type="checkbox"/> Aspect 1 <input type="checkbox"/> 0, non traité ni revêtu 2 <input type="checkbox"/> 1, Colmatés 3 <input type="checkbox"/> 2, Revêtus
<b>Nodules / Concrétions</b> 1 <input type="checkbox"/> Abondance 2 <input type="checkbox"/> 0, pas de nodules 3 <input type="checkbox"/> 1, très peu nombreux (<2%) 4 <input type="checkbox"/> 2, peu nombreux (2...<5%) 5 <input type="checkbox"/> 3, assez nombreux (5...<15%) 6 <input type="checkbox"/> 4, nombreux (15...<40%) 7 <input type="checkbox"/> 5, très nombreux (40...<80%) 8 <input type="checkbox"/> 6, dominants (≥80%)	1 <input type="checkbox"/> Dimensions 2 <input type="checkbox"/> 1, extrêmement fins (<1mm) 3 <input type="checkbox"/> 2, très fins (1...<2mm) 4 <input type="checkbox"/> 3, fins (2...<6mm) 5 <input type="checkbox"/> 4, moyens (6...<20mm) 6 <input type="checkbox"/> 5, gros (20...<60mm) 7 <input type="checkbox"/> 6, très gros (≥60mm)	1 <input type="checkbox"/> Type 2 <input type="checkbox"/> 1, nodules peu durés 3 <input type="checkbox"/> 2, nodules 4 <input type="checkbox"/> 3, concrétions peu durées 5 <input type="checkbox"/> 4, concrétions	1 <input type="checkbox"/> Dureté 2 <input type="checkbox"/> 1, tendre 3 <input type="checkbox"/> 2, dur
1 <input type="checkbox"/> Nature 2 <input type="checkbox"/> 1, tendre 3 <input type="checkbox"/> 2, carbonatée 4 <input type="checkbox"/> 3, siliceuse 5 <input type="checkbox"/> 4, carbonate et siliceuse 6 <input type="checkbox"/> 5, ferrugineuse 7 <input type="checkbox"/> 6, sesquioxidique 8 <input type="checkbox"/> 7, ferromanganique 9 <input type="checkbox"/> 8, alumineuse 10 <input type="checkbox"/> 9, autre	<b>Forme</b> 1 2 3 4 5 6 1, arrondis; 2, allongés; 3, aplatis; 4, irréguliers	<b>Racines</b> 1 <input type="checkbox"/> Abondance 2 <input type="checkbox"/> 0, pas de racines 3 <input type="checkbox"/> 1, très peu nombreuses (<8/dm <sup>2</sup> ) 4 <input type="checkbox"/> 2, peu nombreuses (8...<16/dm <sup>2</sup> ) 5 <input type="checkbox"/> 3, nombreuses (16...<32/dm <sup>2</sup> ) 6 <input type="checkbox"/> 4, très nombreuses (≥32/dm <sup>2</sup> )	1 <input type="checkbox"/> Localisation 2 <input type="checkbox"/> 1, dans la masse 3 <input type="checkbox"/> 2, dans les agrégats 4 <input type="checkbox"/> 3, entre les agrégats 5 <input type="checkbox"/> 4, dans les fissures 6 <input type="checkbox"/> 5, dans les schaux 7 <input type="checkbox"/> 6, évitant les zones compactes
1 <input type="checkbox"/> Orientation 2 <input type="checkbox"/> 1, verticale 3 <input type="checkbox"/> 2, horizontale 4 <input type="checkbox"/> 3, oblique 5 <input type="checkbox"/> 4, quelconque	<b>Ciments</b> 1 <input type="checkbox"/> Nature 2 <input type="checkbox"/> 0, pas de ciment 3 <input type="checkbox"/> 1, non identifiée 4 <input type="checkbox"/> 2, carbonatée 5 <input type="checkbox"/> 3, siliceuse 6 <input type="checkbox"/> 4, carbonate et siliceuse 7 <input type="checkbox"/> 5, ferrugineuse 8 <input type="checkbox"/> 6, sesquioxidique 9 <input type="checkbox"/> 7, humo-ferrugineuse 10 <input type="checkbox"/> 8, humique 11 <input type="checkbox"/> 9, autre	1 <input type="checkbox"/> Épaisseur 2 <input type="checkbox"/> 1, fins (<10mm) 3 <input type="checkbox"/> 2, moyennement épais (10...<50 mm) 4 <input type="checkbox"/> 3, épais (≥50mm)	1 <input type="checkbox"/> Dureté 2 <input type="checkbox"/> 1, très tendres 3 <input type="checkbox"/> 2, tendres 4 <input type="checkbox"/> 3, durs 5 <input type="checkbox"/> 4, très durs
1 <input type="checkbox"/> Régularité 2 <input type="checkbox"/> 1, irréguliers 3 <input type="checkbox"/> 2, réguliers	1 <input type="checkbox"/> Structure 2 <input type="checkbox"/> 0, aucune 3 <input type="checkbox"/> 1, lamellaire 4 <input type="checkbox"/> 2, vésiculaire 5 <input type="checkbox"/> 3, pisolitique 6 <input type="checkbox"/> 4, nodulaire	1 <input type="checkbox"/> Etat sanitaire 2 <input type="checkbox"/> 1, Saines 3 <input type="checkbox"/> 2, Nécrosées 4 <input type="checkbox"/> 3, Pourries 5 <input type="checkbox"/> 4, Gainées de rouille	1 <input type="checkbox"/> Dimensions 2 <input type="checkbox"/> 1, très fines (<0,5mm) 3 <input type="checkbox"/> 2, fines (0,5...<2mm) 4 <input type="checkbox"/> 3, moyennes (2...<5mm) 5 <input type="checkbox"/> 4, grosses (5...<20mm) 6 <input type="checkbox"/> 5, très grosses (≥20mm)
1 <input type="checkbox"/> Contact 2 <input type="checkbox"/> 0, Pas de modification de la matrice 3 <input type="checkbox"/> 1, concentration non identifiée 4 <input type="checkbox"/> 2, décoloration / ou défermentation 5 <input type="checkbox"/> 3, concentration carbonatée 6 <input type="checkbox"/> 4, concentration ferrugineuse 7 <input type="checkbox"/> 5, concentration argileuse 8 <input type="checkbox"/> 6, concentration organique 9 <input type="checkbox"/> 7, concentration saline	1 <input type="checkbox"/> Pénétration 2 <input type="checkbox"/> 0, non déviées 3 <input type="checkbox"/> 1, gênées par des obstacles de nature physique 4 <input type="checkbox"/> 2, gênées par des obstacles de nature chimico-biologique		

Saisie des horizons du profil

STIPA 2000 - U.F.R. Science du Sol - INRA Montpellier modifiée InfoSol 2006

N°profil  N°Etude

### Schéma du profil

#### Éléments grossiers

Abondance % volume		% EG (A)		% EG (B)		Nature (A et B)	
1	<input type="text"/>	1	<input type="text"/>	1	<input type="text"/>	1	<input type="text"/>
2	<input type="text"/>	2	<input type="text"/>	2	<input type="text"/>	2	<input type="text"/>
3	<input type="text"/>	3	<input type="text"/>	3	<input type="text"/>	3	<input type="text"/>
4	<input type="text"/>	4	<input type="text"/>	4	<input type="text"/>	4	<input type="text"/>
5	<input type="text"/>	5	<input type="text"/>	5	<input type="text"/>	5	<input type="text"/>
6	<input type="text"/>	6	<input type="text"/>	6	<input type="text"/>	6	<input type="text"/>

Forme (A et B)		Taille (A et B)		Réaction (A et B)	
1	<input type="text"/>	1	<input type="text"/>	1	<input type="text"/>
2	<input type="text"/>	2	<input type="text"/>	2	<input type="text"/>
3	<input type="text"/>	3	<input type="text"/>	3	<input type="text"/>
4	<input type="text"/>	4	<input type="text"/>	4	<input type="text"/>
5	<input type="text"/>	5	<input type="text"/>	5	<input type="text"/>
6	<input type="text"/>	6	<input type="text"/>	6	<input type="text"/>

Transformation (A et B)		Orientation globale (A et B)		Type d'horizon	
1	<input type="text"/>	1	<input type="text"/>	1	<input type="text"/>
2	<input type="text"/>	2	<input type="text"/>	2	<input type="text"/>
3	<input type="text"/>	3	<input type="text"/>	3	<input type="text"/>
4	<input type="text"/>	4	<input type="text"/>	4	<input type="text"/>
5	<input type="text"/>	5	<input type="text"/>	5	<input type="text"/>
6	<input type="text"/>	6	<input type="text"/>	6	<input type="text"/>

#### Commentaires : sur les différents horizons

1 \_\_\_\_\_

2 \_\_\_\_\_

3 \_\_\_\_\_

4 \_\_\_\_\_

5 \_\_\_\_\_

6 \_\_\_\_\_

#### Type d'horizon O

1	<input type="text"/>	1, horizonOLn
2	<input type="text"/>	2, horizonOLv
3	<input type="text"/>	3, horizonOLt
4	<input type="text"/>	4, horizonOLfr
5	<input type="text"/>	5, horizonOLfm
6	<input type="text"/>	6, horizonOLfc
7	<input type="text"/>	7, horizonOLhr
8	<input type="text"/>	8, horizonOLhf
9	<input type="text"/>	9, horizonOLhta
10	<input type="text"/>	10, horizonOLhc
11	<input type="text"/>	11, horizonOLm

5

Saisie de l'environnement du profil

STIPA 2000 - U.F.R. Science du Sol - INRA Montpellier modifiée InfoSol 2006

N°profil  N°Etude

### Profil synthétique

\* Cette case est à cocher dans le cas d'une discontinuité observée dans le profil (pour la variable en question)

Code classification <input type="checkbox"/> 1, classification française CPCSCS <input type="checkbox"/> 2, classification allemande <input type="checkbox"/> 3, classification britannique <input type="checkbox"/> 4, classification canadienne <input type="checkbox"/> 5, classification mondiale (WRB 1998) <input type="checkbox"/> 6, classification USDA <input type="checkbox"/> 7, référentiel pédologique (RP 1995)		WRB1998 <input type="text"/>	SéquenceHorizons <input type="text"/>
Différenciations (4 types possibles) 0, nondifférencié 1, peu différencié 2, différencié par la texture 3, différencié par la charge en EG 4, différencié par l'effervescence 5, différencié par la salinité 6, différencié par la couleur 7, différencié par la structure 8, différencié par la compacité 9, différencié par la perméabilité 10, différencié par la nature du matériau 11, différencié par le drainage 12, différencié par les accumulations 13, différencié par le pH 14, différencié par les racines 15, différencié par les faciès culturaux		Charge E.G. 0, sans charge 1, à charge de graviers 2, à charge de cailloux 3, à charge de pierres 4, à charge de blocs 5, à charge de graviers et de cailloux 6, à charge de graviers et de pierres 7, à charge de graviers et de blocs 8, à charge de cailloux et de pierres 9, à charge de cailloux et de blocs 10, à charge de pierres et de blocs 11, à charge de graviers, de cailloux, de pierres et de blocs 12, à charge de graviers, de cailloux et de pierres 13, à charge de graviers, de cailloux et de blocs 14, à charge de cailloux, de pierres et de blocs	Effervescence <input type="checkbox"/> 0, nulle <input type="checkbox"/> 1, faible <input type="checkbox"/> 2, modérée <input type="checkbox"/> 3, forte <input type="checkbox"/> 4, extrêmement forte
Conséquence de la discontinuité <input type="checkbox"/> 1, obstacle à la pénétration de l'eau <input type="checkbox"/> 2, obstacle à la pénétration des racines <input type="checkbox"/> 3, obstacle au travail du sol <input type="checkbox"/> 4, obstacle à la remontée capillaire		Salinité <input type="checkbox"/> 0, non salé ( $\leq 2$ mS/cm) <input type="checkbox"/> 1, légèrement salé ( $2 < \dots \leq 4$ mS/cm) <input type="checkbox"/> 2, moyennement salé ( $4 < \dots \leq 8$ mS/cm) <input type="checkbox"/> 3, salé ( $8 < \dots \leq 16$ mS/cm) <input type="checkbox"/> 4, très salé ( $> 16$ mS/cm)	Couleur <input type="checkbox"/> 1, rouge <input type="checkbox"/> 2, rouge-brun <input type="checkbox"/> 3, brun-rouge <input type="checkbox"/> 4, brun <input type="checkbox"/> 5, brun-jaune <input type="checkbox"/> 6, jaune <input type="checkbox"/> 7, jaune-vert <input type="checkbox"/> 8, vert <input type="checkbox"/> 9, bleu <input type="checkbox"/> 10, gris <input type="checkbox"/> 11, noir <input type="checkbox"/> 12, blanc
Artificialisation <input type="checkbox"/> 1, profil artificiellement tronqué <input type="checkbox"/> 2, profil recouvert d'une couche allochtone <input type="checkbox"/> 3, profil artificiellement constitué d'une manière à reproduire le sol naturel <input type="checkbox"/> 4, profil constitué d'une manière différente du sol naturel		Compacité <input type="checkbox"/> 1, meuble <input type="checkbox"/> 2, peu compact <input type="checkbox"/> 3, compact <input type="checkbox"/> 4, très compact	Perméabilité <input type="checkbox"/> 1, imperméable <input type="checkbox"/> 2, peu perméable <input type="checkbox"/> 3, modérément perméable <input type="checkbox"/> 4, perméable <input type="checkbox"/> 5, très perméable
Arrêt description <input type="checkbox"/> 1, horizon C atteint <input type="checkbox"/> 2, horizon M, Rou D atteint <input type="checkbox"/> 3, nappe atteinte <input type="checkbox"/> 4, profondeur suffisante atteinte <input type="checkbox"/> 5, autre contrainte		Texture <input type="checkbox"/> 1, sableuse <input type="checkbox"/> 2, limoneuse <input type="checkbox"/> 3, argileuse <input type="checkbox"/> 4, équilibrée	Structure <input type="checkbox"/> 0, non structuré <input type="checkbox"/> 1, peu structuré <input type="checkbox"/> 2, structuré <input type="checkbox"/> 3, fortement structuré
Racines <input type="checkbox"/> 0, pas de racines <input type="checkbox"/> 1, peu de racines <input type="checkbox"/> 2, nombreuses racines <input type="checkbox"/> 3, très nombreuses racines		Intérêt description <input type="checkbox"/> 1, profil très intéressant <input type="checkbox"/> 2, profil moyennement intéressant <input type="checkbox"/> 3, profil peu intéressant	
Distribution Racines <input type="checkbox"/> 1, verticale régulière <input type="checkbox"/> 2, irrégulière <input type="checkbox"/> 3, sub-superficielle		Humus <input type="checkbox"/> 1, Mull <input type="checkbox"/> 2, hydromull <input type="checkbox"/> 3, moder <input type="checkbox"/> 4, hydromoder <input type="checkbox"/> 5, mor <input type="checkbox"/> 6, hydromor <input type="checkbox"/> 7, anmoor <input type="checkbox"/> 8, tourbe	
Discontinuité majeure <input type="checkbox"/>		Prof. discontinuité (cm) <input type="text"/>	
Type profil <input type="checkbox"/> 1, profil fictif <input type="checkbox"/> 2, profil vrai <input type="checkbox"/> 3, sondage <input type="checkbox"/> 4, analyse agronomique <input type="checkbox"/> 5, profil composite du RMQS		Triangle de texture <input type="checkbox"/> 1, pas de diagramme triangulaire <input type="checkbox"/> 2, triangle CSSBM (Belgique) <input type="checkbox"/> 3, triangle USDA, FAO, IRAT <input type="checkbox"/> 4, triangle carte des sols de l'Aisne <input type="checkbox"/> 5, triangle GEPPA <input type="checkbox"/> 6, triangle UK <input type="checkbox"/> 7, triangle ORSTOM <input type="checkbox"/> 8, triangle SOGREAH	

Commentaires sur le profil : \_\_\_\_\_

6

## Table des figures

Fig. 1 : Carte des sols de la Normandie issue d'un travail d'harmonisation des Référentiels Régionaux Pédologiques de Basse-Normandie et de Haute-Normandie (Le Gouée P., 2024) .....	9
Fig. 2 : Propriétés, fonctions et services écosystémiques (Adhikari K., Hartemink A. E., 2016, version française) .....	14
Fig. 3 : la Métropole Rouen Normandie en 71 communes (source : MRN) .....	17
Fig. 4 : Tableau de bord démographique, économique, social et écologique de la Métropole Rouen Normandie (source : MRN) .....	18
Fig. 5 : Planning de réalisation de l'étude .....	20
Fig. 6 : Fiches de relevés STIPA 2000 (source : INRA) .....	26
Fig. 7 : Règles de représentation des limites (Source : Legros J. P., 1996) .....	32
Fig. 8 : Bilans hydriques de Petitville et de Rouen-Boos .....	37
Fig. 9 : Classification du GEPPA des sols hydromorphes .....	39
Fig. 10 : Notes de qualité des textures en système Maraîchage .....	40
Fig. 11 : Notes de qualité des épaisseurs en système Maraîchage .....	41
Fig. 12 : Notes de qualité des textures en système Élevage .....	41
Fig. 13 : Paramètres pour la détermination de la qualité agronomique des sols selon les 3 orientations de production .....	42
Fig. 14 : nombre de critères retenus et discrétisation en 6 classes du potentiel agronomique .....	43
Fig. 15 : Valeurs de potentialité agronomique prédites par le modèle SQUAT (à gauche) et estimées par les agriculteurs (à droite) .....	44
Fig. 16 : Données d'entrée pour caractériser les facteurs de l'évaluation de l'aléa érosion .....	48
Fig. 17 : Diagramme textural et sensibilité à la battance des sols (source : INRAe) .....	49
Fig. 18 : Taux de recouvrement du sol pour les cultures principales (source : Arvalis) .....	51
Fig. 19 : Combinaison des données d'entrée par démarche additive .....	52
Fig. 20 : Structuration du modèle SCALES .....	53
Fig. 21 : Classification des données d'entrée du modèle et niveaux de pression érosive associés .....	55
Fig. 22 : Correspondance entre les classes SQUAT et les classes de l'indicateur Potentiel de production de biomasse de MUSE .....	58
Fig. 23 : Potentiel d'infiltration et profondeur d'un plancher imperméable .....	58
Fig. 24 : Potentiel d'infiltration et textures .....	59
Fig. 25 : Fonction de pédotransfert de Toth .....	59
Fig. 26 : Exemple de valeurs issues de la fonction de pédotransfert de Toth .....	59
Fig. 27 : Potentiel d'infiltration et perméabilité selon la fonction de pédotransfert de Toth .....	60
Fig. 28 : Potentiel d'infiltration et hydromorphie des sols .....	61
Fig. 29 : Potentiel d'infiltration et déclivité des versants .....	61
Fig. 30 : Notes finales du potentiel d'infiltration .....	61
Fig. 31 : Stock de carbone dans le sol et la litière selon les occupations du sol .....	62
Fig. 32 : Stock de carbone et indices de stockage du carbone dans les sols .....	62
Fig. 33 : Occupation du sol et abondance lombricienne des sols .....	63
Fig. 34 : Occupation du sol et richesse lombricienne des sols .....	63
Fig. 35 : Occupation du sol, abondance et richesse lombricienne des sols .....	63
Fig. 36 : Indicateurs de biodiversité des sols .....	64
Fig. 37 : Évaluation de la multifonctionnalité des sols .....	64
Fig. 38 : Optimum de multifonctionnalité potentielle des sols urbains .....	65
Fig. 39 : Capacité des sols à exercer toute ou partie des fonctions associées à un sol naturel en fonction du type de couverture des sols .....	65
Fig. 40 : Modalités de l'imperméabilisation .....	66
Fig. 41 : Modalités des couverts arborés .....	67

Fig. 42 : Localisation des 11 sites tests UP et URP sur la Métropole Rouen Normandie.....	69
Fig. 43 : Reconnaissance des sols urbains et validation des prospections terrain à la tarière pour tous les sites tests.....	70
Fig. 44 : Les 3 entités topographiques sur le territoire métropolitain .....	73
Fig. 45 : Le contexte géologique métropolitain .....	74
Fig. 46 : Positionnement des points de sondage en zone AU .....	75
Fig. 47 : Localisation de tous les sondages tarière sur le territoire métropolitain .....	76
Fig. 48 : Exemple de profil de sol aux points de sondage .....	76
Fig. 49 : Localisation des 30 fosses pédologiques sur le territoire métropolitain .....	77
Fig. 50 : Tracto-pelle mobilisé pour ouvrir les fosses pédologiques .....	78
Fig. 51 : Profil de sol rafraîchi et décrit .....	78
Fig. 52 : Échantillons ensachés, référencés puis acheminés au LILANO de Saint-Lô.....	79
Fig. 53 : Exemple de fiche analytique 1/2 .....	79
Fig. 54 : Exemple de fiche analytique 2/2 .....	80
Fig.55 : Caractéristiques pédologiques codées pour le postillage .....	81
Fig. 56 : Exemple de codification des types de sol.....	81
Fig. 57 : Codification des épaisseurs, textures et éléments grossiers .....	82
Fig. 58 : Exemple de résultats issus du pastillage.....	82
Fig. 59 : Exemple de compréhension des logiques d'organisation spatiale des sols.....	83
Fig. 60 : Exemple de résultats issus du maquettage .....	84
Fig. 61 : Exemples d'erreur topologique dans la couche SIG des zones A, N et AU .....	85
Fig. 62 : Digitalisation des UCS sur le territoire métropolitain .....	85
Fig. 63 : Exemple de précision de la numérisation des UCS.....	86
Fig. 64 : Organisation morphologique de la Métropole .....	86
Fig. 65 : Les UCS en contexte de plateau .....	87
Fig. 66 : Exemple de NÉOLUVISOL sur limons de plateau, fosse ID 378.....	88
Fig. 67 : Exemple de NÉOLUVISOL-RÉDOXISOL sur limons de plateau, fosse ID 136 .....	89
Fig. 68 : Exemple de LUVISOL à caractère rédoxique sur limons de plateau, fosse ID 13 .....	90
Fig. 69 : Exemple de BRUNISOL à caractère rédoxique sur argiles à silex, fosse ID 33 .....	91
Fig. 70 : Exemple de RANKOSOL à substrat meuble sur argiles à silex, fosse ID 133 .....	92
Fig. 71 : Exemple de RENDOSOL sur craie crétacée, fosse ID 727 .....	93
Fig. 72 : Les UCS en contexte de vallée .....	94
Fig. 73 : Exemple d'ARÉNOSOL sur alluvions anciennes des basses terrasses de la Seine, fosse ID 868 .....	96
Fig. 74 : Exemple d'HISTOSOL recouvert sur alluvions anciennes des basses terrasses de la Seine, fosse ID 593 .....	97
Fig. 75 : Exemple de RÉDOXISOL fluviatique carbonaté sur alluvions récentes de la Seine, fosse ID 691 .....	98
Fig. 76 : Exemple de COLLUVIOSOL sur colluvions quaternaires, fosse ID 466 .....	99
Fig. 77 : Exemple de COLLUVIOSOL carbonaté sur colluvions carbonatées quaternaires, fosse ID 324 .....	100
Fig. 78 : Les UCS sur le territoire de la Métropole Rouen Normandie .....	101
Fig. 79 : Distribution des grandes familles de sol.....	102
Fig. 80 : L'épaisseur des sols sur le territoire métropolitain .....	103
Fig. 81 : Couverture spatiale des sols selon leur épaisseur.....	103
Fig. 82 : Carte des textures de surface.....	105
Fig. 83 : Couverture spatiale des sols selon les textures de surface .....	105
Fig. 84 : Carte des textures de profondeur .....	106
Fig. 85 : Couverture spatiale des sols selon les textures de profondeur.....	106
Fig. 86 : Classes GEPPA et prédisposition des sols de zone humide .....	107
Fig. 87 : Prédisposition Sols de Zone Humide sur le territoire métropolitain .....	108
Fig. 88 : Couverture spatiale des sols selon leur prédisposition Sols de Zone Humide.....	108

Fig. 89 : Carte des Réservoirs Utiles des sols sur le territoire de la Métropole .....	110
Fig. 90 : Couverture spatiale des sols selon le Réservoir Utile .....	110
Fig. 91 : Carte des déficits hydriques des sols sur le territoire métropolitain .....	112
Fig. 92 : Couverture spatiale des sols selon les déficits hydriques .....	112
Fig. 93 : Carte des surplus hydrologiques des sols sur le territoire de la Métropole .....	114
Fig. 94 : Couverture spatiale des sols selon les surplus hydrologiques .....	114
Fig. 95 : Exemple de données descriptives saisies et stockées dans DONESOL .....	115
Fig. 96 : Exemple de données analytiques saisies et stockées dans DONESOL .....	115
Fig. 97 : Tableau de correspondance entre référencement local et référencement DONESOL des données issues des sondages et des fosses pédologiques 1/2 .....	116
Fig. 98 : Tableau de correspondance entre référencement local et référencement DONESOL des données issues des sondages et des fosses pédologiques 2/2 .....	116
Fig. 99 : Localisation des 17 points de sondage dans les 11 sites tests UP et URP .....	118
Fig. 100 : Profil et types de sols rencontrés dans les 11 sites tests UP et URP .....	121
Fig. 101 : Carte des potentialités agronomiques des sols en système conventionnel pour les zones A, N et AU .....	122
Fig. 102 : Approche par zone des potentialités agronomiques des sols en système conventionnel .....	123
Fig. 103 : Carte des potentialités agronomiques des sols en système Maraîchagel pour les zones A, N et AU .....	123
Fig. 104 : Approche par zone des potentialités agronomiques des sols en système Maraîchage .....	124
Fig. 105 : Carte des potentialités agronomiques des sols en système Élevage pour les zones A, N et AU .....	124
Fig. 106 : Approche par zone des potentialités agronomiques des sols en système Élevage .....	125
Fig. 107 : Carte de la pression érosive liée au taux de recouvrement des cultures (zone A) .....	126
Fig. 108 : Surfaces associées aux niveaux de pression érosive liée au taux de recouvrement des cultures (zone A) .....	126
Fig. 109 : Carte de la pression érosive liée aux pentes (zone A) .....	127
Fig. 110 : Surfaces associées aux niveaux de pression érosive liée aux pentes (zone A) .....	127
Fig. 111 : Carte de la pression érosive liée à la battance des sols (zone A) .....	128
Fig. 112 : Surfaces associées aux niveaux de pression érosive liée à la battance des sols (zone A) .....	128
Fig. 113 : Carte de la sensibilité potentielle des milieux à l'érosion hydrique des sols (zone A) .....	129
Fig. 114 : Surfaces associées aux niveaux de sensibilité potentielle des milieux à l'érosion hydrique (zone A) .....	129
Fig. 115 : Carte de l'érosivité pluviale (zone A) .....	130
Fig. 116 : Surfaces associées à l'érosivité pluviale (zone A) .....	130
Fig. 117 : Carte de l'aléa érosion hydrique des sols sur le territoire métropolitain (zone A) .....	131
Fig. 118 : Surfaces associées aux niveaux de l'aléa érosion hydrique des sols (zone A) .....	131
Fig. 119 : Carte de la prédisposition à l'aléa érosion hydrique des sols sur le territoire métropolitain (zone N) .....	132
Fig. 120 : Surfaces associées à sensibilité potentielle des milieux à l'érosion hydrique, à l'érosivité pluviale et aux niveaux de prédisposition à l'aléa érosion hydrique des sols (zone N) .....	133
Fig. 121 : Carte de la fonction de production de biomasse sur le territoire métropolitain .....	134
Fig. 122 : Surfaces associées au potentiel agronomique de sols en zones A, N, AU et UP/URP .....	135
Fig. 123 : Carte de la fonction régulation du cycle de l'eau sur le territoire métropolitain .....	136
Fig. 124 : Surfaces associées au potentiel d'infiltration de sols en zones A, N, AU et UP/URP .....	137
Fig. 125 : Carte de la fonction réservoir de carbone sur le territoire métropolitain .....	138
Fig. 126 : Surfaces associées au réservoir de carbone des sols en zones A, N, AU et UP/URP .....	139
Fig. 127 : Carte de la fonction de réservoir de biodiversité des sols sur le territoire métropolitain .....	140
Fig. 128 : Surfaces associées au réservoir de biodiversité des sols en zones A, N, AU et UP/URP .....	141
Fig. 129 : Carte de la multifonctionnalité des sols sur le territoire métropolitain .....	142
Fig. 130 : Surfaces associées à la multifonctionnalité des sols en zones A, N, AU et UP/URP .....	143

Fig. 131 : Fonctionnalités assez élevées et élevées dans la classe 3 de la multifonctionnalité des sols (zone AU) .....	144
Fig. 132 : Fonctionnalités assez élevées et élevées dans la classe 3 de la multifonctionnalité des sols. Exemple de sites en zone AU .....	144
Fig. 133 : Carte du taux d'imperméabilisation des sols sur le territoire métropolitain .....	146
Fig. 134 : % d'imperméabilisation dans la couche végétale urbaine de la Métropole .....	146
Fig. 135 : Carte de la densité du couvert arboré sur le territoire métropolitain .....	147
Fig. 136 : % de couverture arborée dans la couche végétale urbaine de la Métropole .....	148
Fig. 137 : Carte de la capacité fonctionnelle des sols urbains dans la couche végétale urbaine de la Métropole .....	149
Fig. 138 : Carte de la capacité fonctionnelle assez élevée et optimale des sols urbains dans la couche végétale urbaine de la Métropole .....	150
Fig. 139 : Exemple de continuité fonctionnelle des sols dans la couche végétale urbaine de la Métropole .....	151
Fig. 140 : Carte du potentiel de développement de ceintures maraîchères sur le territoire métropolitain .....	154
Fig. 141 : Secteurs propices à l'implantation d'une ceinture maraîchère .....	155
Fig. 142 : Secteurs propices au développement ou au maintien de l'élevage sur la Métropole .....	156
Fig. 143 : Secteur de Saint-Paër propice au développement ou au maintien de l'élevage sur la Métropole .....	156
Fig. 144 : Secteur de la basse vallée de la Seine entre Sahurs et Jumièges propice au développement ou au maintien de l'élevage sur la Métropole .....	157
Fig. 145 : Secteur de Saint-Jacques-sur-Darnetal/Saint-Léger-du-Bourg-Denis propice au développement ou au maintien de l'élevage sur la Métropole .....	157
Fig. 146 : Secteur de la Neuville-Chant-d'Oisel propice au développement ou au maintien de l'élevage sur la Métropole .....	157
Fig. 147 : Carte des bonnes potentialités agronomiques en système conventionnel et des vulnérabilités de la ressource en eau selon la stratégie foncière eau .....	158
Fig. 148 : Secteurs de recouvrement entre bonnes potentialités agronomiques et vulnérabilités de la ressource en eau selon la stratégie foncière eau .....	159
Fig. 149 : Carte des bonnes potentialités agronomiques en système maraîchage et des vulnérabilités de la ressource en eau selon la stratégie foncière eau .....	160
Fig. 150 : Secteurs de recouvrement entre bonnes potentialités agronomiques en système maraîchage et vulnérabilités de la ressource en eau selon la stratégie foncière eau .....	160
Fig. 151 : Carte des bonnes potentialités agronomiques en système élevage et des vulnérabilités de la ressource en eau selon la stratégie foncière eau .....	161
Fig. 152 : Secteurs de recouvrement entre bonnes potentialités agronomiques en système élevage et vulnérabilités de la ressource en eau selon la stratégie foncière eau .....	162
Fig. 153 : Comparaison des potentialités agronomiques en système élevage et système conventionne pour deux secteurs situés sur les communes de Le Trait et de Oissel .....	163
Fig. 154 : Secteurs en zone AU à bonnes potentialités agronomiques en système conventionnel ...	164
Fig. 155 : Secteurs en zone AU à bonnes potentialités agronomiques en système maraîchage .....	165
Fig. 156 : Potentialités agronomiques en zones UP et URP selon les 3 systèmes de production Conventionnel, Maraîchage et Élevage .....	165
Fig. 157 : Potentialités agronomiques en système conventionnel pour les sites UP et URP .....	166
Fig. 158 : Potentialités agronomiques en système maraîchage pour les sites UP et URP .....	167
Fig. 159 : Secteurs à faibles potentialités agronomiques en système conventionnel sur le territoire métropolitain .....	168
Fig. 160 : Secteurs à faibles potentialités agronomiques en système conventionnel exploités par l'agriculture .....	169
Fig. 161 : Secteurs caractérisés à la fois par des faibles potentialités agronomiques en système conventionnel, des zones agricoles et des réservoirs et couloirs calcicoles et silicicoles .....	170

Fig. 162 : Secteurs à faibles potentialités agronomiques en système conventionnel et vulnérabilité de la ressource en eau selon la stratégie foncière eau .....	171
Fig. 163 : Carte des déficits hydriques des sols sur la Métropole pour la période 1977/2005 .....	173
Fig. 164 : Carte des déficits hydriques des sols sur la Métropole pour la période 2020/2049 selon le scénario RCP 4.5 du GIEC.....	174
Fig. 165 : Contextes les plus sensibles au réchauffement climatique .....	175
Fig. 166 : Carte de l'aléa et de la prédisposition à l'aléa érosion hydrique de niveau assez fort sur la Métropole.....	177
Fig. 167 : Secteurs concernés par un aléa assez fort en zone A.....	178
Fig. 168 : Secteurs concernés par un risque théorique d'érosion hydrique en zone AU .....	179
Fig. 169 : Secteurs concernés par un risque réel d'érosion hydrique en zone U .....	180
Fig. 170 : Secteurs concernés par des bonnes potentialités agronomiques en système maraîchage et un aléa érosion hydrique assez fort.....	181
Fig. 171 : Secteurs concernés par des bonnes potentialités agronomiques en système maraîchage, un aléa érosion hydrique assez fort et une vulnérabilité de la ressource en eau selon la stratégie foncière eau .....	182
Fig. 172 : Secteurs concernés par des bonnes potentialités agronomiques en système élevage et un aléa érosion hydrique assez fort.....	183
Fig. 173 : Secteurs concernés par des bonnes potentialités agronomiques en système maraîchage, un aléa érosion hydrique assez fort et la présence de bétouilles.....	184
Fig. 174 : L'aléa érosion hydrique des sols selon le BRGM (carte du haut) et SCALES (carte du bas) .....	186
Fig. 175 : Secteurs en zone AU caractérisés par une bonne fonction de régulation du cycle de l'eau et une vulnérabilité de la ressource en eau selon la stratégie foncière eau .....	187
Fig. 176 : Secteurs en zones A et N caractérisés par un bon réservoir de biodiversité selon MUSE et selon la TVB .....	190
Fig. 177 : Secteurs en zones AU caractérisés par un bon réservoir de biodiversité selon MUSE associés aux couloirs de biodiversité de la TVB .....	191
Fig. 178 : Secteurs caractérisés par un bon réservoir de biodiversité selon MUSE associés aux couloirs de biodiversité de la TVB .....	192
Fig. 179 : Surfaces UP et URP associées aux valeurs de la fonction de réservoir de biodiversité du sol .....	193
Fig. 180 : Secteurs en zones A et N caractérisés par un bon réservoir de carbone .....	194
Fig. 181 : Secteurs en zones AU caractérisés par un bon réservoir de carbone .....	195
Fig. 182 : Réservoir de carbone en zone UP/URP .....	196
Fig. 183 : Surfaces toutes zones confondues associées aux valeurs de la multifonctionnalité des sols .....	197
Fig. 184 : Multifonctionnalité des sols pour les 11 sites UP et URP .....	198
Fig. 185 : Capacités d'infiltration des eaux pluviales issues du zonage et niveaux de régulation du cycle de l'eau selon MUSE .....	200