

Étude de la vulnérabilité et des pressions qui affectent l'aquifère supérieur des Niayes

Auteur : Hutzemakers, Julien

Promoteur(s) : Brouyere, Serge

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil des mines et géologue, à finalité spécialisée en géologie de l'ingénieur et de l'environnement

Année académique : 2020-2021

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/11482>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Étude de la vulnérabilité et des pressions qui affectent l'aquifère supérieur des Niayes

Université de Liège



Faculté des Sciences Appliquées

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade
de master "Ingénieur civil des mines et géologue"
par HUTZEMAKERS Julien

Promoteur académique : BROUYÈRE Serge

Année académique 2020 - 2021

Abstract

La zone des Niayes, de par sa localisation, est et sera un enjeu important pour le Sénégal. En effet, la zone approvisionne en fruits et légumes la majorité du pays en développement (DGPPE, 2020). L'exploitation intensive de l'aquifère des sables du Quaternaire, associé à une diminution de la pluviométrie liée au changement climatique, demande une gestion réfléchie des ressources en eau aussi bien au niveau quantitatif que qualitatif. Ce travail marque la première étape de mise en place d'un plan de protection de la ressource en eau en mettant en relation les concepts de vulnérabilité et d'aléas. Pour ce faire, la vulnérabilité intrinsèque de l'aquifère sableux a été modélisée par la méthode *APSÛ*, mise en place par l'ULiège afin de quantifier de manière cohérente la capacité du milieu à atténuer une possible contamination. En plus d'identifier les zones de nappe affleurante comme vulnérables, elle introduit l'hypothèse d'une vulnérabilité accentuée dans les zones de cultures irriguées, où une recharge artificielle pourrait augmenter la vitesse d'infiltration. Cette hypothèse devra cependant être confirmée à la suite d'études de terrain et d'analyses complémentaires. Ensuite, les aléas de surfaces, capables d'affecter la qualité de l'aquifère, ont été répertoriés. La combinaison de la vulnérabilité et des aléas a permis d'identifier les zones plus sensibles le long du littoral, dans le fond des vallées et dans la mine de phosphates de Darou Khoudoss, qui demanderaient des recherches approfondies pour une meilleure compréhension des phénomènes hydrogéologiques in situ.

The Niaye region, by its localisation, is and will be of great importance for the Senegal. Indeed, it supplies the majority of fruits and vegetables consumed by the developing country (DGPPE, 2020). The intensive exploitation of the aquifer of quaternary sands, combined with a decrease in rainfall caused by climate change, require a well thought management of the water resource, both in terms of quantity and quality. This paper is the first step in the assessment of a plan to protect the water resources by combining the concepts of vulnerability and hazard. To do so, the intrinsic vulnerability of the sandy aquifer has been modelised with the *APSÛ* method, developed by ULiège to quantify the capacity of the system to mitigate a source of pollution. In addition to identifying the zones where the aquifer lies above ground with a high vulnerability, it introduces the hypothesis of an increased vulnerability by irrigated crops caused by an artificial recharge. However, further studies must be conducted for this hypothesis to be confirmed. Then, the hazards capable of inducing changes in the groundwater quality have been listed. The combination of vulnerability and hazard allowed the identification of the most sensitive zones along the coast, at the bottom of ancient valleys and in the mine of Darou Khoudoss, which require further studies for a better understanding of the in situ hydrogeological conditions.

Remerciements

Je tiens, tout d'abord, à remercier mes promoteurs académique et industriel, Monsieur Serge Brouyère et Monsieur Johan Derouane. Ils m'ont donné l'opportunité de travailler sur un projet à l'étranger portant sur un sujet qui me tenait à coeur. J'ai eu la chance de réaliser mon travail de fin d'études sur un projet qui, en plus de m'intéresser, me semblait utile.

J'aimerais de plus remercier toutes les personnes qui m'ont aidé dans la réalisation de ce travail de fin d'études : Monsieur Philippe Orban et Madame Caroline Thomas.

Je remercie aussi Monsieur Alain Dassargues pour m'avoir donné envie d'étudier l'hydrogéologie et Monsieur Éric Pirard pour m'avoir fait découvrir l'imagerie multispectrale.

J'aimerais remercier ma famille et mes amis qui ont été à mes cotés ces cinq dernières années et ce, même lorsque la distance physique nous séparait.

Finalement, je tiens à remercier Victoria Collignon (Vicol) pour m'avoir accompagné tout au long de mes études.

Table des matières

1	Introduction	9
1.1	Introduction à la zone d'étude	10
1.2	Climat	11
1.3	Géographie	12
1.4	Hydrographie	12
1.5	Géologie	13
1.5.1	Cadre général	13
1.5.2	Description de la géologie	13
1.5.3	Cadre structural	17
1.6	Pédologie	18
1.7	Hydrogéologie	19
1.7.1	Piézométrie	20
1.7.2	Hydrochimie	21
1.7.3	État de l'aquifère	24
1.7.4	Exploitation des ressources	26
2	Vulnérabilité	27
2.1	Conceptualisation de la méthode	28
2.1.1	Types de vulnérabilité	28
2.1.2	Vulnérabilité de la ressource - Vulnérabilité de la source	28
2.1.3	Temps, durée et ampleur de la contamination	28
2.1.4	Infiltration - Ruissellement	29
2.2	Mise en place de la méthode	30
2.2.1	Effets de profondeur : atténuation naturelle	30
2.2.2	Effets de surface : ruissellement	30
2.2.3	Calcul de vulnérabilité	31
2.2.4	Cartes de vulnérabilité	32
2.3	Application à la zone des Niayes : Préparation du modèle	32
2.3.1	MNT, cartes de pentes et de directions d'écoulement	33
2.3.2	Carte d'occupation des sols	34
2.3.3	Carte pédologique	35
2.3.4	Carte de coefficients de ruissellement	37
2.3.5	Carte de recharge en eau utile	38
2.3.6	Épaisseur des couches géologiques	41
2.3.7	Zones d'infiltration directe maximale	45
2.4	Application à la zone des Niayes : Résultats	46
2.4.1	Évaluation des coefficients de dangerosité de la surface du terrain	46
2.4.2	Évaluation de la capacité d'atténuation du milieu souterrain	47
2.4.3	Carte de vulnérabilité des Niayes	50
2.5	Analyse de sensibilité	54
2.5.1	Variation de la recharge	54

2.5.2	Variation des paramètres hydrodynamiques	55
2.5.3	Variation de la dynamique d'écoulement	56
2.6	Discussion des résultats et propositions en vue d'amélioration	57
3	Aléa-pression	60
3.1	Application à la zone des Niayes : Description des données	61
3.1.1	Mines et industries	61
3.1.2	Zones urbaines et d'agriculture intensive	61
3.1.3	Carte aléas de surface	62
3.2	Utilisation d'images multispectrales pour détecter les zones de cultures irriguées .	63
3.2.1	Description de Sentinel-2	63
3.2.2	Image en vraie et fausse couleur	63
3.2.3	Combinaison spectrale	67
3.3	Application à la zone des Niayes : Résultats	70
4	Conclusion	73
5	Bibliographie & Annexes	74
5.1	Bibliographie	74
5.2	Annexes	80

Table des figures

1.1	Carte de la situation générale des Niayes	10
1.2	Diagramme ombrothermique de Mboro en 2019 d'après WWO, 2021	11
1.3	Modèle numérique de terrain	12
1.4	Carte des bassins versants	13
1.5	Carte géologique à 1/500 000 d'après Noël et al., 2009	14
1.6	Coupe morphopédologique des Niayes (Faye, 2017)	17
1.7	Carte des sols d'après FAO, 2021	18
1.8	Carte piézométrique	20
1.9	Évolution des niveaux statiques dans le village de Bayakh	21
1.10	Diagramme de Piper des sables du Quaternaire	23
1.11	Carte des ouvrages étudiés pour l'analyse hydrochimique	23
1.12	Localisation des ouvrages analysés en pesticides et concentrations en nitrates	24
1.13	Utilité des ouvrages répertoriés	26
2.1	Critères sélectionnés pour évaluer la vulnérabilité de la ressource d'après Brouyère et al. (2001)	28
2.2	Mobilité d'un polluant à la surface et dans la zone saturée	29
2.3	Carte de classification de pentes et de directions d'écoulement générées par QGIS sur la base du modèle numérique de terrain de JAXA	33
2.4	Carte d'occupation du sol d'après Copernicus (2021b)	34
2.5	Carte d'occupation du sol simplifiée	35
2.6	Classification américaine de texture du sol (USDA, 1987)	35
2.7	Carte de composition en sable, limon et argile dans les sols	36
2.8	Carte pédologique mise à jour selon la classification des sols belge	37
2.9	Cartes de coefficients de ruissellement et d'infiltration	38
2.10	Emplacements des stations étudiées	39
2.11	Évapotranspiration potentielle et pluviométrie de cinq villages des Niayes	39
2.12	Comparaison entre la hauteur piézométrique et la profondeur de la nappe	41
2.13	Carte géologique d'après Noël et al. (2009) et carte géologique simplifiée	42
2.14	Cas de figures envisagés pour le calcul d'épaisseur de couches	43
2.15	Cartes des épaisseurs de couches supérieures et inférieures non saturées	44
2.16	Carte de dangerosité directe maximale	45
2.17	Exemple de lissage par le modèle	45
2.18	Carte de dangerosité directe	46
2.19	Carte de dangerosité latérale cumulée	47
2.20	Évolution de la concentration en fonction du temps pour différents cas de figure : (i) valeurs données en entrée, (a) et (b) valeurs obtenues en sortie pour des ma- tériaux différents	48
2.21	Carte des temps de transfert minimaux	48
2.22	Carte des temps de transfert minimaux pondérés	49
2.23	Comparaison entre les temps minimaux et les temps minimaux tempérés	50

2.24	Carte de vulnérabilité temps de transfert pondérés	51
2.25	Histogramme des temps minimaux de transfert pondérés	51
2.26	Évolution des temps de parcours minimaux pondérés suite à un changement d'eau utile	54
2.27	Évolution des temps de parcours minimaux pondérés suite à un changement de paramètre hydrodynamique	55
2.28	Évolution des temps de parcours minimaux pondérés suite à un changement de dynamique d'écoulement	56
3.1	Carte des aléas de surface	62
3.2	Image RGB et bandes 4, 3 et 2 mesurées par Sentinel-2	64
3.3	Réponse spectrale de différents matériaux (Pirard, 2020)	65
3.4	Image en fausse couleur et bandes 8, 4 et 3 mesurées par Sentinel-2	66
3.5	Illustration des 4 combinaisons de couleurs pour identifier la végétation	67
3.6	Réponse spectrale de pixels connus	68
3.7	Carte des indices NDVI	69
3.8	Carte des indices NDWI	69
3.9	Carte des aléas de surface mise à jour	70
5.1	Carte géologique du Sénégal à 1/500 000 (Noël et al., 2009)	81
5.2	Carte en isopaques du Mio-Plio-Quaternaire (Roger et al., 2009)	82
5.3	Carte des durées de pollution	83
5.4	Carte des coefficients d'atténuation	83
5.5	Carte de vulnérabilité durées de pollution pondérées	84
5.6	Carte de vulnérabilité atténuation pondérées	84
5.7	Carte de vulnérabilité combinée	85

Liste des tableaux

1.1	Tableau récapitulatif de la géologie d'après Roger et al. (2009)	16
1.2	Analyse statistique de l'hydrochimie dans les sables du Quaternaire (en mg/L)	22
1.3	Pesticides détectés par CERES (2017)	25
2.1	Valeurs des coefficients de ruissellement (Ebener, 2000)	31
2.2	Valeurs de direction d'écoulement d'après Popescu et al. (2004)	33
2.3	Résultats du calcul d'eau utile pour différentes valeurs de stock	40
2.4	Valeurs des paramètres hydrodynamiques des différents matériaux	43
2.5	Classification de la vulnérabilité implémentée dans <i>APSÛ</i>	50
2.6	Percentiles relatifs à la nouvelle classification	52
3.1	Caractéristiques de l'appareil multispectral de Sentinel-2 (Sentinel, 2021)	63

Liste des abréviations

- AEP : Approvisionnement en eau potable
- ANSD : Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie (sénégalaise)
- BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières
- CCI : Climate Change Initiative
- CCNUCC : Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique
- CERES : Centre Régional de Recherche en Ecotoxicologie et Sécurité Environnementale
- CI : Coefficient d'infiltration
- CR : Coefficient de Ruissellement
- DD : Dangerosité Directe
- DGPRE : Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau
- DL : Dangerosité Latérale
- DP : Dangerosité Potentielle
- DR : Dangerosité Réelle
- ESA : European Space Agency
- ET0 ou ETP : Évapotranspiration Potentielle
- FAO : Food and Agriculture Organization of the United Nations
- NDVI : Normalized Difference Vegetation Index
- NDWI : Normalized Difference Water Index
- NIR : Near InfraRed (infrarouge proche = [780 nm ; 1400 nm])
- SIG : Système d'Information Géographique
- SWIR : Short Wave Infrared (infrarouge lointain = [1400 nm ; 3000 nm])
- URH : Unité de Réponse Hydrologique
- USDA : United States Department of Agriculture
- WWO : World Weather Online

Chapitre 1

Introduction

La zone des Niayes, de par sa localisation, est et sera un enjeu important pour le futur du Sénégal. En effet, la zone en développement est responsable de la production de fruits et légumes de la majorité des habitants du pays. L'exploitation des ressources en eau de manière durable est donc primordiale. Des pompages trop intensifs pourraient induire des changements de piézométries et, non seulement appauvrir les ressources, mais aussi induire des intrusions d'eau salées le long de la côte. De plus, une mauvaise gestion des cultures pourraient amener à des contaminations de la nappe en nitrates et pesticides.

Ce travail s'intéresse à la capacité du sous-sol à atténuer de manière naturelle une contamination et mets ces résultats en relation avec les pressions potentielles de surface.

Pour ce faire, le premier chapitre présente la zone d'étude aux niveaux climatique, géographique, hydraulique, géologique et hydrogéologique.

Le deuxième chapitre s'intéresse à la vulnérabilité de l'aquifère. D'abord, les concepts derrière la méthode utilisée (*APŜŨ*) sont expliqués. Ensuite, son application à la zone d'étude est décrite. Enfin, une étude de sensibilité est effectuée afin de donner de poids aux résultats obtenus malgré l'incertitude liée aux hypothèses posées dans la réalisation du modèle.

Le troisième chapitre répertorie les aléas de surface pouvant affecter la qualité de l'eau souterraine. Les champs irrigués étant d'une importance critique pour la zone, une étude sur base d'images multispectrales est menée pour identifier ces zones avec une résolution spatiale de dix mètres. La fin de ce chapitre comprend une description des résultats ainsi qu'une carte reprenant la vulnérabilité de l'aquifère, les aléas de surface et les ouvrages répertoriés. Ainsi, les émetteurs potentiels, le temps de transfert d'un contaminant fictif depuis la surface jusqu'à la ressource et les récepteurs sont identifiés dans une seule carte.

L'approche de cartographie menée dans ce travail constitue la première étape dans un contexte de protection et gestion de l'aquifère en améliorant la compréhension générale des mécaniques hydrogéologiques dans la zone des Niayes.

1.1 Introduction à la zone d'étude

La zone des Niayes s'étend sur le littoral entre Dakar et Saint-Louis. Longues de 130 kilomètres pour une largeur variant entre 10 et 25 kilomètres, les Niayes traversent les départements de Thiès, Tivouane, Kébémér et Louga (DGPRE, 2020). La Carte 1.1 présente la zone d'étude au sein du paysage sénégalais.

La limitation des Niayes n'est pas univoque. En effet, d'un point de vue éco-géographique, les Niayes constituent une bande littorale d'une largeur de 10 kilomètres. Par contre, la limite agro-écologique comprend la ville de Thiès, située d'avantage dans les terres (DGPRE, 2020).

À l'origine, les Niayes tiennent leur nom des dépressions dunaires remplies d'eau météorique une partie de l'année. Au total, 389 cuvettes de forme et taille variables peuvent être répertoriées (CSE, 2006).

La zone étudiée dans ce travail est délimitée par une zonation hydrogéologique. Celle-ci, d'une surface de 3100 km^2 , délimite la frontière fictive de l'aquifère des sables du Littoral Nord selon la DGPRE (2020). Les Niayes composant la majorité de la zone étudiée, celle-ci sera référencée comme tel par simplicité.

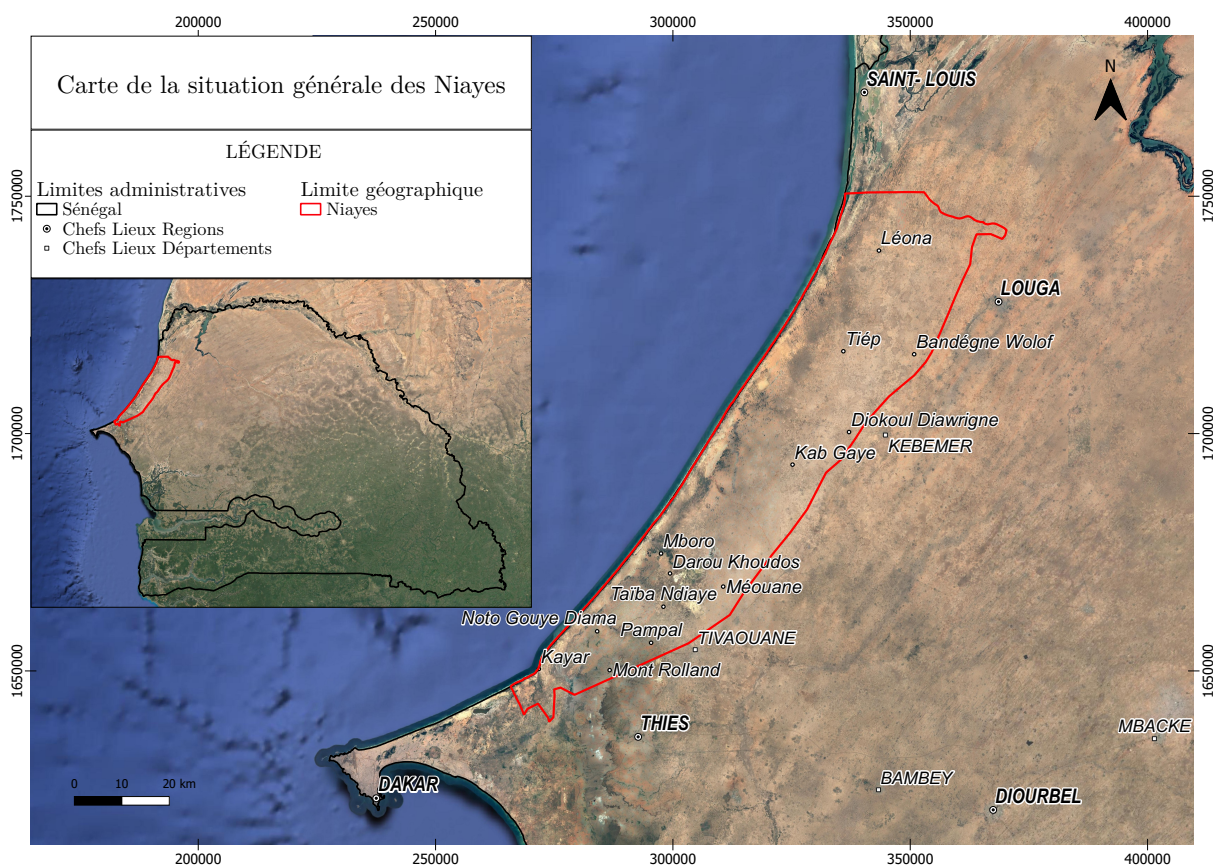


FIGURE 1.1 – Carte de la situation générale des Niayes

Les Niayes sont une région agricole importante pour le pays. En effet, la région produit 80% des fruits et légumes consommés au Sénégal, la quasi-totalité étant distribuée dans la région de Dakar composée de 4 millions d'habitants (ANSD, 2016 ; CSE, 2006 ; Mbaye, 1999).

L'agriculture intensive combinée au changement climatique induit des pressions importantes sur les ressources en eau, primordiales pour l'équilibre de la région (DGPRE, 2020).

1.2 Climat

Les Niayes se situent dans la zone climatique sub-canarienne malgré une latitude sahélienne en raison de leur proximité avec l’océan Atlantique (Sall & Vanclooster, 2009). En effet, les alizées transportent un vent chaud et sec entre mai et juin tandis qu’un vent maritime apporte de l’air frais le reste de l’année (DGPRE, 2020).

Les températures, plus douces qu’au centre du pays, varient entre 27 et 31°C tout au long de l’année. La période de Mous-son est étendue entre les mois de juillet et octobre pour une plu- viométrie totale annuelle variant entre 350mm à Saint-Louis et 550 mm à Dakar . En moyenne, celle- ci comprend 35 jours pluvieux par an (DGPRE, 2020 ; WWO, 2021). La Figure ci-contre pré- sente le diagramme ombrother- mique de Mboro, un petit village côtier représentatif de la météo- rologie générale de la zone d’étude.

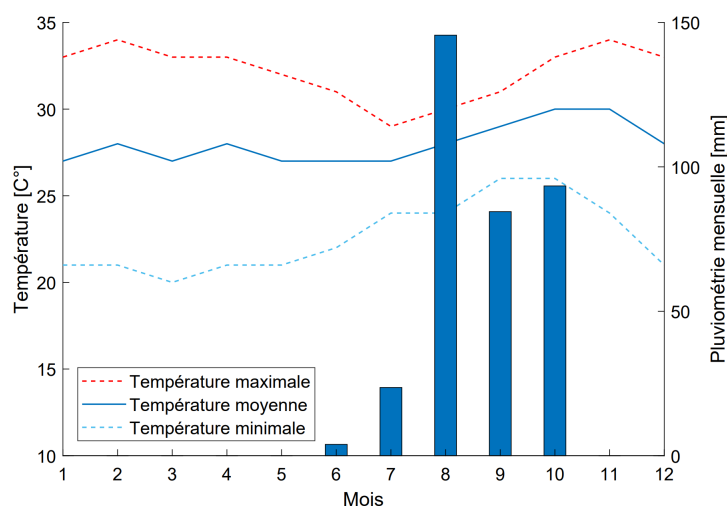


FIGURE 1.2 – Diagramme ombrothermique de Mboro en 2019 d’après WWO, 2021

Depuis les années 1970, les effets du changement climatique peuvent se faire sentir aussi bien sur les températures que la pluviométrie. Les effets les plus néfastes sur les ressources en eau et les conditions de vie sont de 3 types :

- la remontée du niveau marin et l’érosion côtière ;
- la désertification, entraînant la réduction des zones de mangroves, sources de biodiversité importantes ;
- la salinisation des sols et des eaux, diminuant ainsi l’activité économique mais aussi l’approvisionnement en eau potable (DGPRE, 2020).

Les études initiées par le Gouvernement du Sénégal dans le cadre de la Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique (CCNUCC) ont montré que les changements de pluviométrie influenceraient plus le sud que le nord du pays. Ces dernières années, d’importantes sécheresses ont entraîné le dépérissement de certaines cultures.

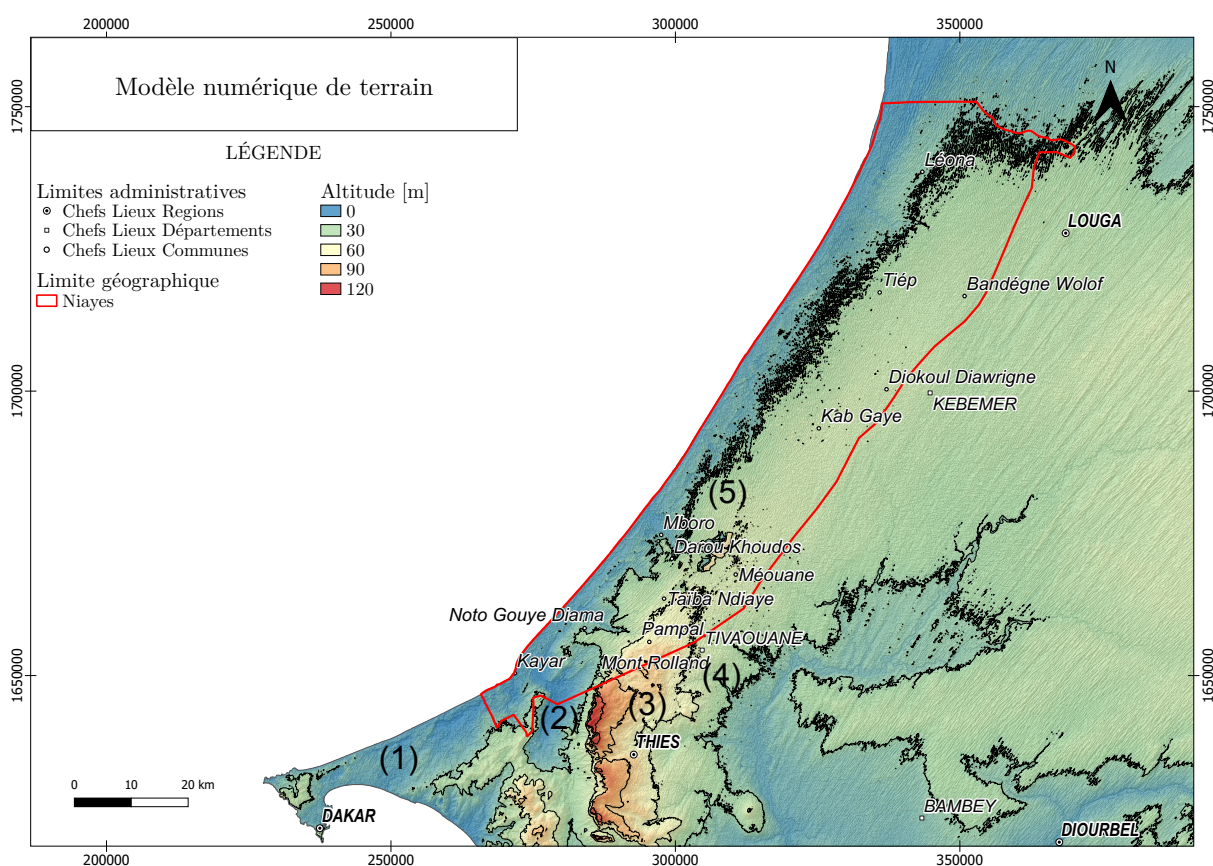
Les études ont de plus montré un gradient de variation de température positif Est-Ouest avec des valeurs variant entre 0,8 °C et 1,1 °C, la côte étant moins impactée grâce à l’effet d’upwelling des courants marins (DGPRE, 2020 ; Rutledge et al., 2011).

L’impact du changement climatique sur les ressources en eau peut se faire sur deux échelles : l’échelle saisonnière, où la piézométrie peut présenter des variations de un mètre, et l’échelle interannuelle où l’on note une baisse continue des niveaux indiquant une tendance à l’épuisement des stocks (Aguiar et al., 2010 ; DGPRE, 2020).

1.3 Géographie

La Figure 1.3 présente le modèle numérique de terrain avec une résolution de 30 mètres. Celle-ci a été réalisée sur la base des données de l'agence spatiale japonaise JAXA, qui rend accessibles des données topographiques et météorologiques à l'échelle mondiale gratuitement (JAXA, 2021). Les isohypses sont de 30 mètres et une classification linéaire a été choisie.

D'ouest en est, plusieurs régions naturelles peuvent être identifiées : la presqu'île du Cap Vert entourée par l'océan (1), le Horst de Diass qui forme un relief peu accentué jusqu'à 120 mètres d'altitude et qui plonge vers le Nord en direction de Kayar (2), la falaise de Thiès bordant le plateau éponyme culminant le paysage aux alentours (3), le bassin de Car Car plongeant en direction du delta du Saloum (4) et la région des Niayes à basse altitude et son relief dirigé par des dunes pouvant atteindre 30 mètres (5) (Barusseau et al., 2009 ; Sall & Vanclooster, 2009).



1.4 Hydrographie

Ce modèle numérique de terrain a permis de calculer l'étendue des bassins versants et rivières à l'aide d'un Système d'Information Géographique (SIG). Le résultat est exposé Figure 1.4.

Il est cependant important de noter que la zone d'étude ne connaît pas de rivière pérenne. En effet, en raison des dépressions dunaires, de la faible pente générale et des conditions climatiques, aucun cours d'eau constant ne peut être répertorié dans les Niayes (DGPRES, 2014).

Les bassins versants calculés ici peuvent toutefois être utilisés pour discriminer la zone littorale des bassins versants reconnus, comme le bassin du fleuve Sénégal au nord, de la Somone au sud de Thiès et de Car Car à l'est (DGPRES, 2020).

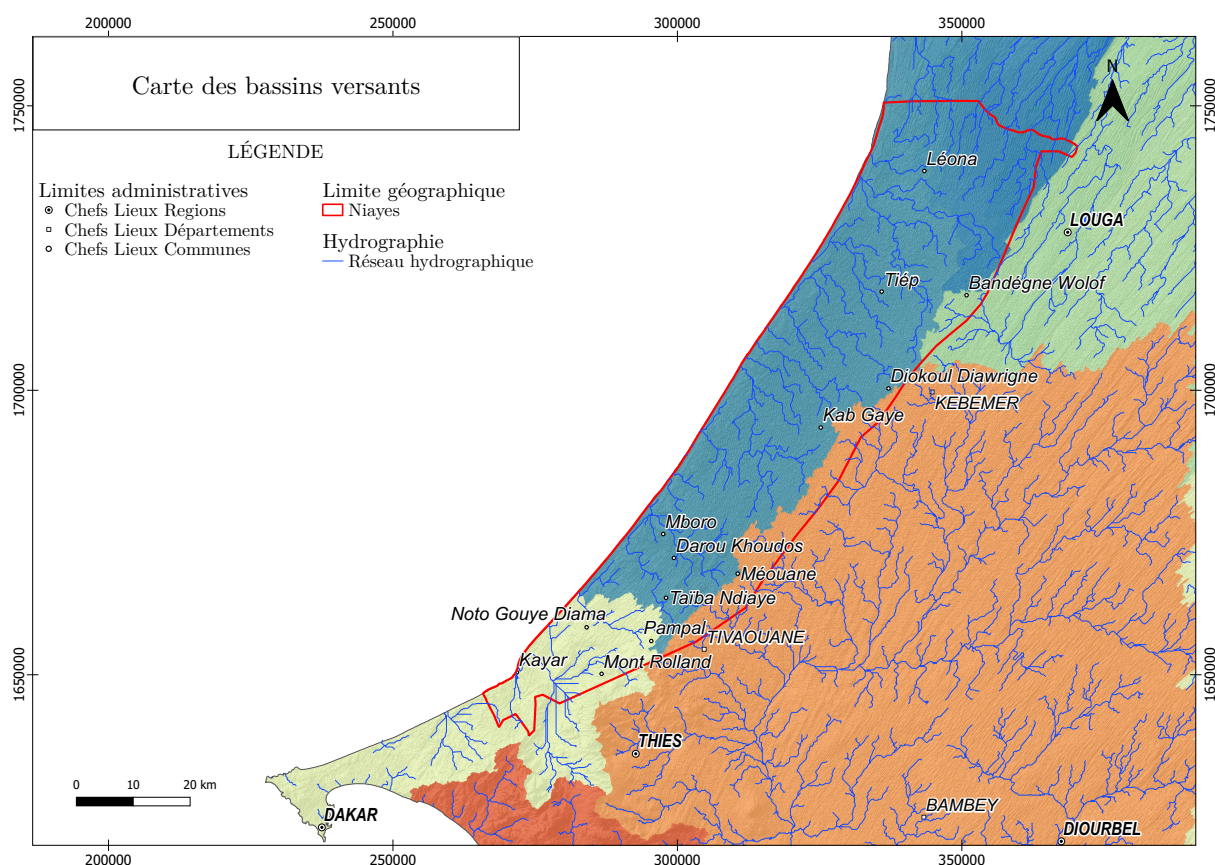


FIGURE 1.4 – Carte des bassins versants

1.5 Géologie

1.5.1 Cadre général

Les Niayes s'inscrivent dans la zone occidentale du bassin sénégalo-mauritanien. Celui-ci couvre plus des trois quarts du territoire sénégalais. Il forme un plateau ne dépassant pas les 50 mètres d'altitude. Limité vers le nord par le fleuve Sénégal, à l'est par la chaîne des Mauritanides et au sud par le bassin de Bové. Il atteint une longueur de 1300 kilomètres pour une largeur maximale de 550 kilomètres à la latitude de Dakar et une puissance totale de près de 7 kilomètres, représentant des couches du Trias au Quaternaire. Le bassin de marge passive repose en discordance sur un socle Paléozoïque-Protérozoïque plissé et présente un léger pendage Nord-Ouest plongeant vers l'Atlantique (Barusseau et al., 2009 ; Faye, 2017).

1.5.2 Description de la géologie

L'étude de vulnérabilité portant sur l'aquifère superficiel, seules les couches formées entre le Paléocène et le Quaternaire, affleurant sous la couche de sables, seront présentées en détail ci-dessous.

La carte géologique ainsi que la description des différentes formations est basée sur les travaux de Barusseau et al. 2009 et leur révision effectuée par Roger et al. la même année. Ces études, financées notamment par le Sénégal et l'Union européenne, ont été principalement organisées par le BRGM et GEOTER pour permettre la mise à jour de la carte géologique à l'échelle 1/500 000. La Carte 1.5 reprend la carte de 2009 centrée sur la zone d'étude. La carte originale est toutefois disponible dans les annexes.

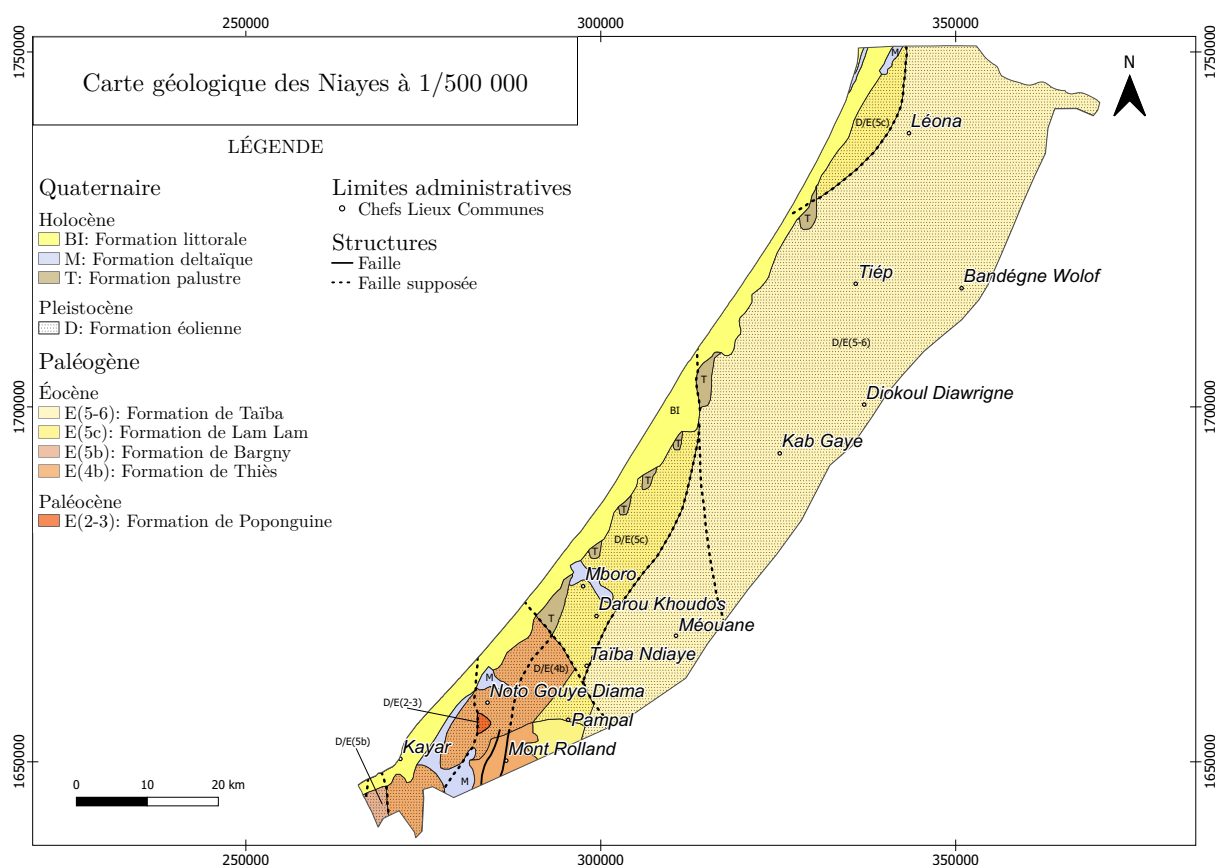


FIGURE 1.5 – Carte géologique à 1/500 000 d'après Noël et al., 2009

Paléocène : Sélandien et Thanétien

E(2-3) Formation de Poponguine

Cette formation n'affleure que très légèrement dans la zone d'étude, entre Noto Gouye Diame et Diambalo. Cette série est composée de calcaires coquilliers à mollusques de puissance variable, représentative d'une sédimentation carbonatée de plate-forme.

Éocène inférieur : l'Yprésien

La fin de l'Éocène inférieur se traduit par une transgression marine importante qui a entraîné une sédimentation plus fine et sonne la fin de la plate-forme carbonatée.

E(4b) Formation de Thiès

À l'est du Graben de Rufisque, de Thiès et Joal, les faciès Éocène inférieur sont largement affleurants. La Formation de Thiès rassemble différents faciès bien représentés au pied de la falaise du même nom, cumulant entre 100 et 190 mètres de dépôt.

En raison de la transgression, les faciès rencontrés dans la Formation de Thiès sont composés d'argiles blanches à horizons phosphato-glaucanieux silicifiés.

Éocène moyen : le Lutétien

Après la phase de transgression de l'Yprésien, le Lutétien marque la réinstallation d'une plate-forme carbonatée à faciès alternant marnes et calcaires.

Malgré une importante épaisseur, le Lutétien n'affleure que rarement en surface en raison de l'épaisse couche de sable ferrugineux surplombante.

E(5b) Formation de Bargny

Cette formation affleurant sous la couche de sables rubéfiés au sud-ouest de Kayar est composée d'une alternance marno-calcaires à lits phosphatés silicifiés et de marnes à débris osseux phosphatés. Cette formation, plus en bordure d'océan, est le témoin d'une sédimentation plus profonde en bordure de plate-forme.

E(5c) Formation de Lam Lam

Suite aux travaux de prospection sur les phosphates, Flicoteaux (1975) a subdivisé la fin de l'Éocène moyen en quatre unités, les deux premières étant regroupées dans la Formation de Lam Lam et les deux suivantes dans la Formation de Taïba.

Cette formation comprend d'abord une unité de calcaires à algues et argiles phosphatées sur laquelle repose une alternance de marnes à calcaires jaunes.

E(5-6) Formation de Taïba

Cette dernière formation de l'Éocène moyen comprend des alternances de calcaires et de marnes phosphatées à nummulites.

Quaternaire : le Pléistocène

La sédimentation quaternaire qui suit est essentiellement détritique à faciès continental, avec des dépôts margino-littoraux sur la côte.

D Formation éolienne

Les sables rubéfiés des dunes continentales composent les ergs présents sur la quasi totalité du pays et pouvant atteindre une puissance de 100 mètres. Ainsi, six ergs peuvent être différenciés sur tout le territoire selon l'orientation des dunes : celui de Sangalkam, de Pikine, de Keur Mas-sar - Bambilor, de Noto, de Lompoul et de Tivouane.

Il ne s'agit pas ici de cordon littoral mais bien de dunes continentales mises en place en période désertique. Leur nom provient de l'importante concentration en oxydes de fer causée par leur latérisation.

Certaines études considèrent ces dunes comme faisant partie du groupe "Continental Terminal" et les datent au Plio-Miocène. Le cuirassement ferrugineux se serait alors développé durant le Pléistocène (Conrad & Lappartient, 1987). D'autres, en revanche, considèrent que ces dunes se sont formées au cours de l'Ogolien (Faye, 2017).

C'est dans ces bancs de sables que les Niayes sont présentes. Les dépressions dans lesquelles l'aquifère affleure sont soit petites et de direction NNW-SSE, soit beaucoup plus vastes et pénétrant plus loin dans les terres (Faye, 2017).

Quaternaire : l'Holocène

T Formation palustre

Sur le littoral entre Saint-Louis et Dakar, des dépôts marécageux développés autour de lagunes se localisent autour des dépressions interdunaires des Niayes. Témoignage d'un climat plus humide, ces dépôts riches en matière organique sont composés de sables humifères localement tourbeux à intercalations argileuses ne dépassent pas une épaisseur de 14 mètres et sont parfois référencés comme le "sol noir des Niayes".

M Formation deltaïque

Les systèmes fluviatiles se sont peu développés dans la zone d'étude du fait de l'absence de relief marqué. C'est pourquoi les dépôts d'alluvion présents dans les anciennes vallées ne dépassent pas les 10 mètres de puissance. Ces alluvions sont composées majoritairement de vases et sables des vasières localement argileuses ou graveleuses.

BI Formation littorale

Finalement, les sables des plages et des cordons dunaires, manifestations des derniers épisodes de transgression marine sont venus s'ajouter au paysage côtier. Ces cordons littoraux peuvent être divisés en deux catégories : les dunes blanches et les dunes jaunes.

Ère	Pér.	Sér.	Étage	Formation	Lithologie	Abr.
Cénozoïque	Quaternaire	Holocène	Maghalayen	Formation littorale	Sables des plages et des cordons dunaires : barrières littorales	BI
			Northgrippien	Formation deltaïque	Vases et sables coquilliers des <i>slikes</i> , <i>shorres</i> et lagunes	M
			Greenlandien	Formation palustre	Sables humifères interdunaires, localement tourbeux	T
		Pléistocène	Pléistocène supérieur	Formation éolienne	Sables rubéfiés des dunes continentales	D
			Pléistocène moyen			
			Calabrien			
			Gélasien			
	Paléogène	Éocène	Lutétien	Formation de Taïba	Calcaires et marnes phosphatés	E(5-6)
				Formation de Lam Lam	Alternance de marnes à discocyclines et de calcaires jaunes à mollusques, oursins et algues	E(5c)
				Formation de Bargny	Alternance marno-calcaire à lits phosphatés silicifiés	E(5b)
			Yprésien	Formation de Thiès	Argiles et marnes blanches à atapulgitite et horizons phosphatoglaucconieux silicifiés	E(4b)
		Paléocène	Thanétien Selandien	Formation de Popngvine	Calcaires coquilliers à mollusques	E(2-3)

TABLE 1.1 – Tableau récapitulatif de la géologie d'après Roger et al. (2009)

1.5.3 Cadre structural

L'ouverture de l'Atlantique a induit des contraintes importantes sur le bassin sénégalais qui ont conduit à la création d'un dense réseau de failles subméridiennes à l'est de la presqu'île de Cap-Vert (Failles du Graben de Rufisque). Ces déformations cassantes ont provoqué la création d'une succession de Horst et Graben en subsurface (Barusseau et al., 2009).

Plus à l'est, le Horst de Diass soulève l'entièreté du bassin pour faire affleurer des couches de l'Éocène à 100 mètres d'altitude. Celui-ci, limité par la faille de la falaise de Thiès, serait largement sous-estimé en raison de l'épaisse couche de sables latérisés présente en surface rendant son étude difficile.

Plus au nord-est, la faille de Tivouane bordant le plateau de Thiès rejoint la faille de Mboro longeant la côte actuelle (Barusseau et al., 2009 ; Roger et al., 2009). Le réseau de failles et les différentes structures peuvent être observées sur la carte 1.5.

Le paysage de la zone est composé principalement de trois types de dunes distincts fixant la géomorphologie des Niayes (Figure 1.6) :

- Les dunes blanches, littorales ou vives. Ces dunes sont présentes sur une largeur ne dépassant pas quelques centaines de mètres et tiennent leur nom de leur couleur causée par les coquilliers et leur granulométrie fine. En raison de cette dernière, les dunes peuvent se déplacer de près de 7 mètres par an. Pour pallier à ce risque d'érosion qui pourrait avoir des conséquences néfastes sur les villages côtiers, le Sénégal a décidé il y a 10 ans de faire pousser de la végétation sur celles-ci (DGPRE, 2014 ; DGPRE, 2020).
- Les dunes jaunes ou semi-fixées, plus anciennes et plus larges. Elles présentent une granulométrie plus importante. Leur orientation générale nord-nord-est est l'expression générale des alizées. Des lacs se retrouvent intercalés dans ce cordon près de Thiès pour former des sols hydromorphes, riches en matière organique (DGPRE, 2014 ; Sall & Vanclooster, 2009)
- Les dunes rouges, présentées dans la section précédente comme les sables rubéfiés.

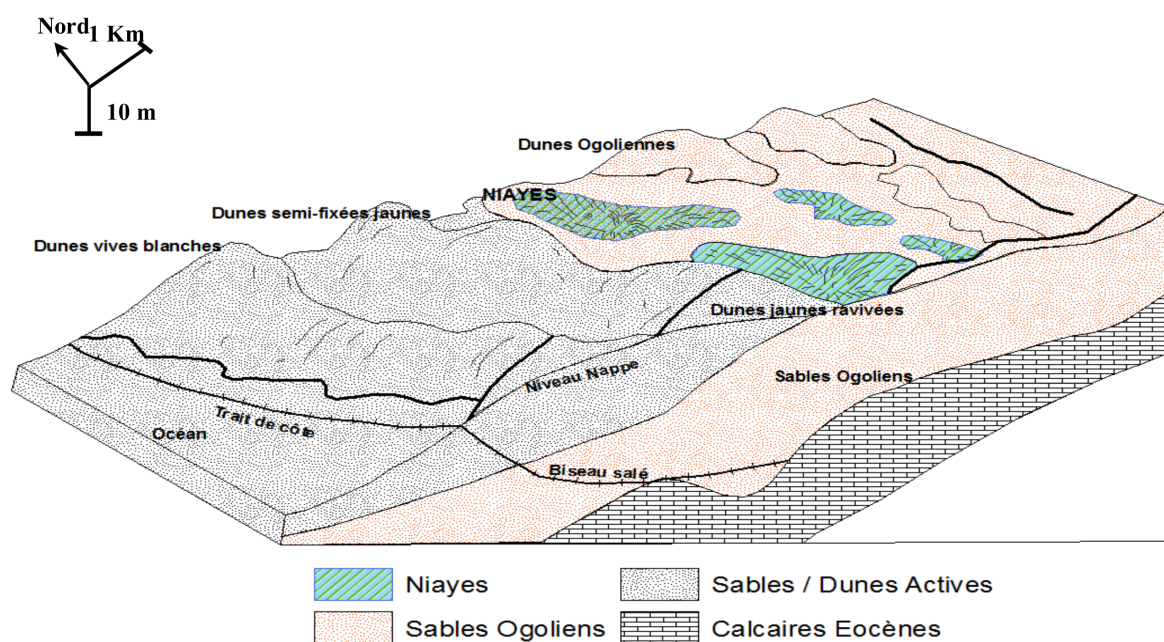


FIGURE 1.6 – Coupe morphopédologique des Niayes (Faye, 2017)

1.6 Pédologie

La Carte 1.7 présente les différents types de sols d'après la base de données HWSD (Harmonized World Soil Database) mise en place dès 2009 par la FAO (Food and Agricultural Organization of the United Nations). La version 1.2 utilisée pour ce travail constitue une base de données reprenant de nombreux paramètres pédologiques à l'échelle 1/5000 000 pour le monde entier. Ces paramètres reprennent le type de sol avec une nomenclature harmonisée, sa profondeur, sa composition en matière organique mais aussi sa composition en argile, limon et sables, ainsi que sa texture associée (FAO, 2021 ; Nachtergaele et al., 2009).

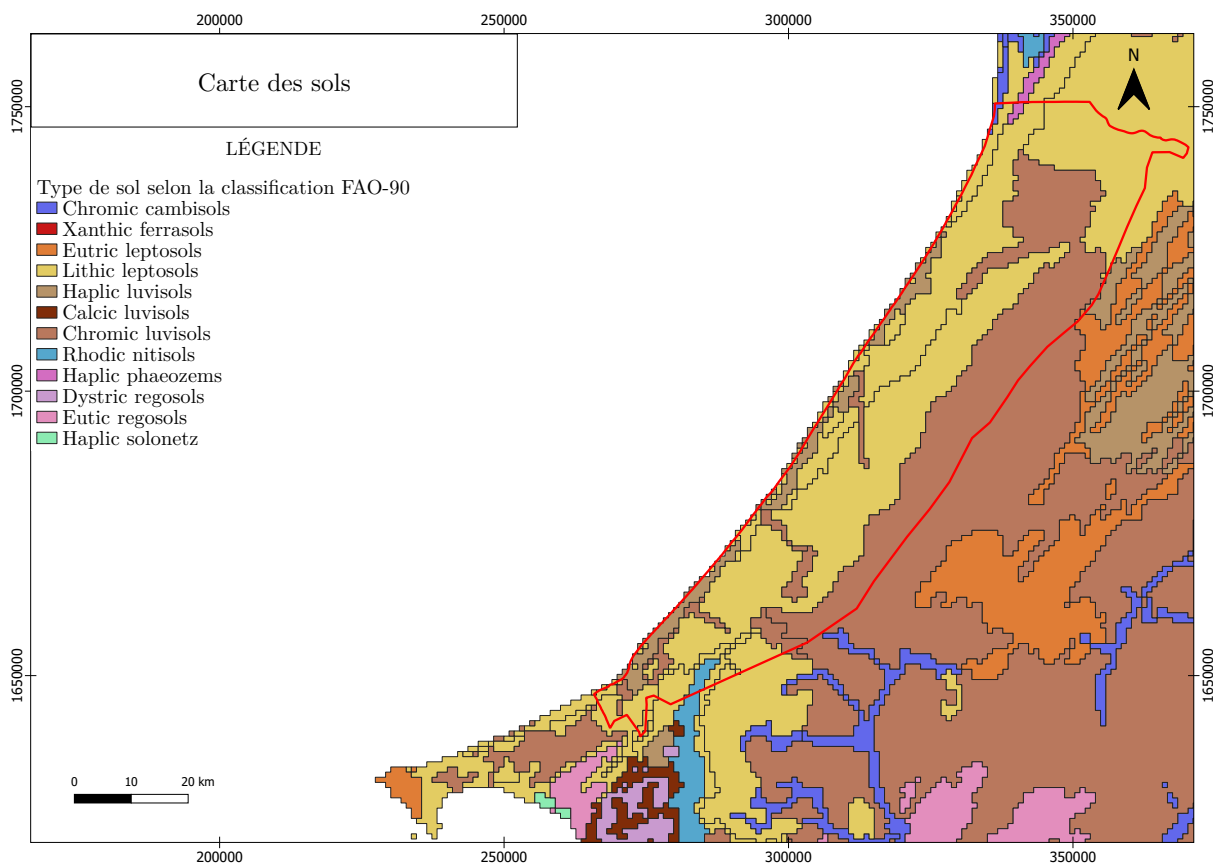


FIGURE 1.7 – Carte des sols d'après FAO, 2021

D'après la carte ci-dessus, deux grands groupes parmi les 30 du système de classification de la FAO sont presque exclusivement présents dans les Niayes.

Luvisols

Les luvisols sont des sols avec une minéralogie riche et un grand pouvoir drainant, les rendant intéressants pour toute activité agricole (Britannica, 2016a ; FAO, 1974). C'est pourquoi la majorité des cultures irriguées se sont développées sur ceux-ci dans la région (DGPRE, 2020).

Dans ce groupe, deux types de sols se distinguent dans les Niayes :

- Haplic Luvisols, le long de la côte. Le préfixe signifie que le sol se rattache entièrement à son groupe sans distinction ou spécificité (FAO, 1974).
- Chromic luvisol, correspondant notamment aux sols hydromorphes plus sombres formés par d'anciens cours d'eau, formant de fines lamelles vers l'océan (DGPRE, 2020).

Leptosols

Les leptosols recouvrent presque la totalité du paysage. Il s'agit de sols avec une couverture ne dépassant pas les 10 centimètres (Britannica, 2016b). Ils correspondent à la couche supérieure du profil latéritique. En effet, une fine couche de sol se trouve généralement au dessus des sables tropicaux ferrugineux (sables rubéfiés) dans un tel contexte climatique et topographique (Vuilleumier, 2021).

1.7 Hydrogéologie

Comme annoncé dans la section 1.5.1, les Niayes reposent sur le bassin sénégal-mauritanien. Celui-ci s'est posé en discordance sur un socle Paléozoïque-Protérozoïque non exploitable pour ses ressources en eau en raison de sa profondeur. Ainsi, la zone comprend trois systèmes majeurs, tous situés dans les couches du bassin (DGPRE, 2020).

Système profond

Cet aquifère captif reprend les couches sableuses du Maastrichtien et les calcaires karstifiés du Paléocène. Les sables du Maastrichtien constituent un gigantesque réservoir exploité et continu dans tout l'intérieur du Sénégal. Sa minéralogie et sa profondeur font cependant de lui un aquifère peu exploité dans la zone des Niayes. En effet, les aquifères supérieurs sont largement plus exploités la région. Quelques forages existent cependant dans les zones d'agriculture intensive pour fournir des débits plus importants. Le suivi de l'exploitation de ces forages est primordial en raison du caractère salé que peuvent avoir les eaux du Maastrichtien. Une mauvaise gestion pourrait appauvrir la qualité du sol et donc le rendement des cultures.

La faible puissance des calcaires du Paléocène et leur profondeur font d'eux un aquifère très peu exploité dans la zone des Niayes (DGPRE, 2020 ; Barusseau et al., 2009 ; Fall et al., 2017 ; Roger et al., 2009).

Système intermédiaire

Les calcaires du Lutétien offrent des ressources importantes. Ils sont partout en continuité hydraulique avec les sables dunaires quaternaires qui les surmontent (Roger et al., 2009 ; DGPRE, 2020 ; Faye, 2017). Le système précédent étant moins sensible aux effets de surface et ce système étant en continuité hydraulique avec les couches supérieures, le reste de l'étude sera tournée uniquement sur le système supérieur.

Système superficiel

Le système supérieur comprend majoritairement les sables plio-quaternaires et les sables côtiers du quaternaire. Il s'agit de l'aquifère le plus exploité dans la zone. Celui-ci approvisionne non seulement les villages et les nombreuses cultures de la zone, mais aussi une partie de la ville de Dakar (25%). Les réserves importantes, l'activité agricole intensive et le changement climatique font de cet aquifère un enjeu majeur pour le futur de la région (Aguiar et al., 2010 ; DGPRE, 2020). Le suivi du niveau piézométrique est le premier pas dans la caractérisation des ressources générales.

1.7.1 Piézométrie

La carte piézométrique 1.8 a été réalisée sur base de données de la DGPRES. En effet, une base de données "Réseau" suit l'évolution physico-chimique de 584 puits répartis sur le Bassin Ara-chidier depuis 1976. Celui-ci recouvre les plaines du centre-ouest du Sénégal jusqu'aux bordures du Ferlo à l'Est et jusqu'à la Gambie au Sud, couvrant une superficie de 57 300 km² (DGPRES, 2020). Au total, 16635 données sont reprises de cette année à aujourd'hui.

Chaque donnée reprend un ouvrage et son niveau statique (en plus des valeurs hydrochimiques). Ces niveaux statiques ont été comparés à l'altitude reprise dans le modèle numérique de terrain présenté Figure 1.3.

En raison de l'importante variation saisonnière des niveaux statiques, les niveaux considérés datent de la même période : entre mai et octobre 2019. Cette période a été choisie après analyse de l'évolution des niveaux d'eau. En effet, cette période débute 6 mois après la période de mousson et se termine juste avant le début de la suivante.

L'année 2019, en plus de présenter une pluviométrie normale pour les Niayes, est l'année offrant le plus de valeurs depuis 7 ans (WWO, 2021).

Ainsi, 41 points ont permis de réaliser la Figure 1.8¹ à l'aide d'une interpolation cubique. Il est à noter que cette interpolation ne prend pas en compte les variations de conductivité hydraulique aux suites d'hétérogénéités dans le milieu mais constitue une approximation des véritables niveaux de la nappe en un temps donné.

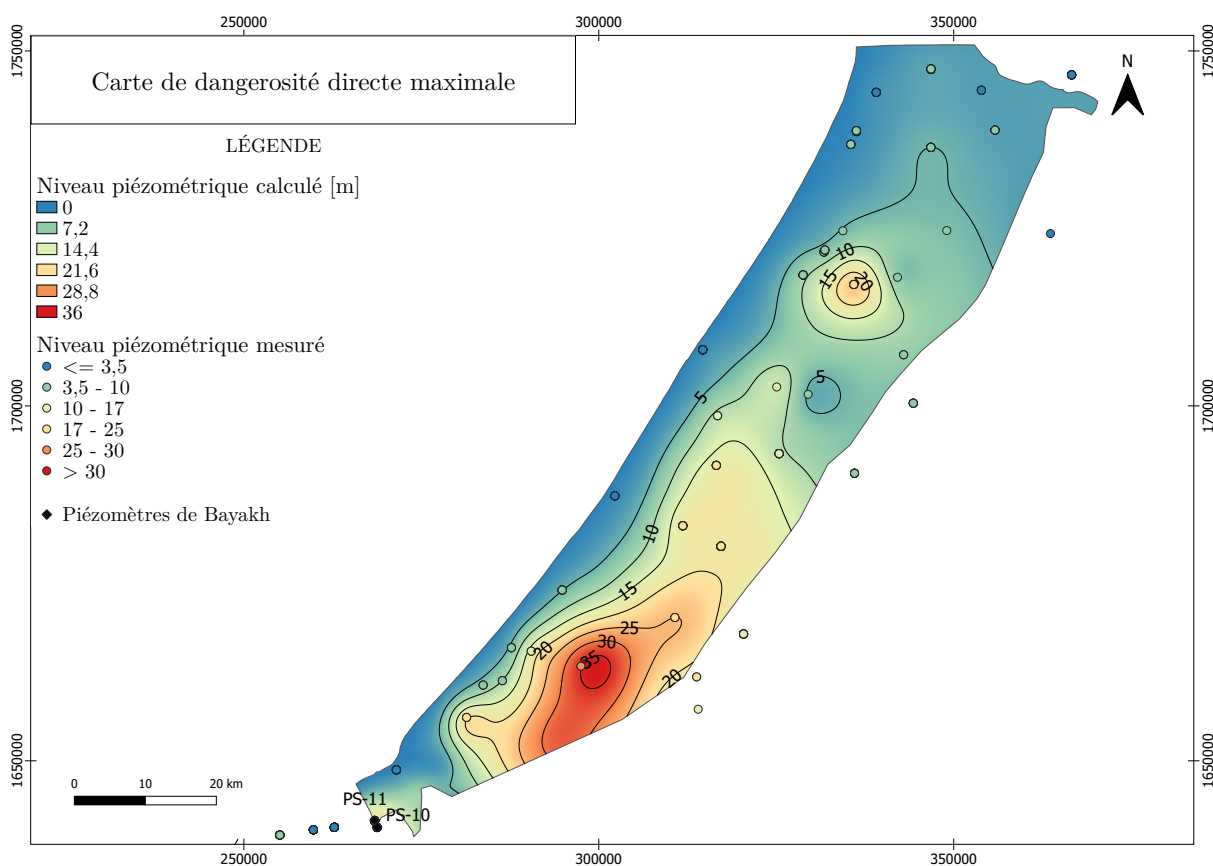


FIGURE 1.8 – Carte piézométrique

1. Il est à noter que la classification est une fois de plus linéaire et non discrète. Une multitude de couleurs est donc représentée sur la carte entre chaque valeur de la légende.

La forme générale des isopièzes est en accord avec les études précédentes (Aguilar et al., 2010 ; DGPRE, 2020 ; Faye, 2017 ; Roger et al., 2009). On y voit un dôme piézométrique partant du Horst de Diass et longeant la limite des bassins-versants. L'eau s'écoule donc vers l'océan à l'ouest et vers les calcaires du Lutétien à l'est, formant ainsi une barrière naturelle contre une possible salinisation sur la côte. Dans ce deuxième cas, le drainage de la nappe est favorisé à la fois par les pompages étalés entre Tivaouane et Louga, et la diminution d'épaisseur des sables favorisant l'évapotranspiration (Roger et al., 2009).

Fluctuation des niveaux piézométriques

Le graphe ci-contre a lui aussi été réalisé à partir de la base de données "Réseau". Il permet d'observer la tendance du niveau statique à baisser d'année en année ainsi qu'une variation saisonnière induite par la recharge directe des pluies. Ces deux comportements ont déjà été observés dans Faye (2017) et DGPRE (2020). L'allure des courbes confirme l'impact de la baisse des pluies mais les résultats peuvent aussi être influencés par les effets des prélèvements parfois importants dans cette zone (Faye, 2017).

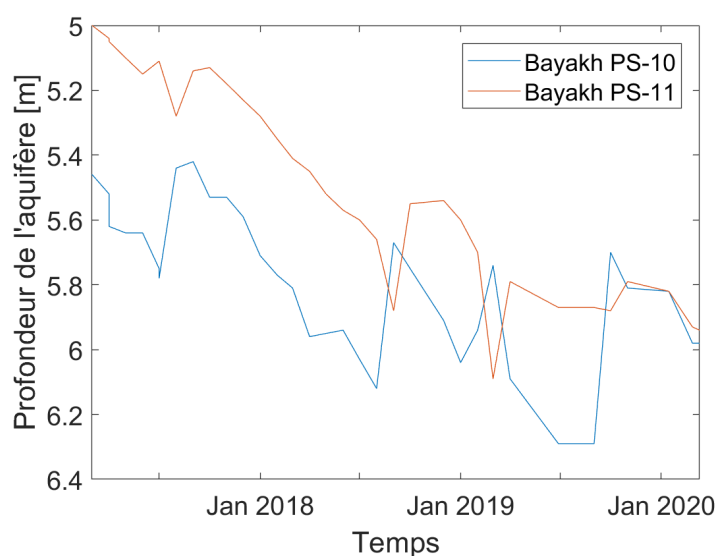


FIGURE 1.9 – Évolution des niveaux statiques dans le village de Bayakh

L'effet des baisses se traduit surtout au niveau des ouvrages proches de la côte littorale où la minéralisation accentuée de l'eau peut atteindre $1000 \mu\text{s/cm}$. Il est à noter que l'année 2020 a connu une pluviométrie très élevée comparée à la baisse générale de ces dernières années. Cette tendance à la baisse s'observe dans tous les ouvrages des puits et piézomètres, ce qui démontre le régime transitoire du système causé par un déficit de la pluviométrie et une surexploitation de l'aquifère (Aguilar et al., 2010 ; DGPRE, 2020 ; Faye, 2017).

Cette baisse généralisée qui traduit une diminution des charges hydrauliques du système a pour conséquence une progression de l'interface eau douce/eau salée vers le continent. Mais il faut toutefois souligner que ce phénomène est un processus très lent et l'impact réel ne pourra être perçu que si la nappe subit une forte pression au niveau de la frange littorale (Faye, 2017).

1.7.2 Hydrochimie

L'aquifère sableux du Quaternaire contient des eaux beaucoup moins minéralisées que celui du Maastrichtien. En raison du dôme piézométrique protégeant de l'influence de l'océan, les cas d'intrusion d'eau salée ne sont observés que dans les zones côtières où l'aquifère est surexploité, notamment pour les activités agricoles (DGPRE, 2020).

Les eaux sont généralement plus minéralisées dans les dunes rouges que dans les dunes du littoral en raison de la latérisation des sables rubéfiés dans les dunes continentales (Faye, 2017). Des concentrations plus élevées en Fer sont d'ailleurs attendues dans celles-ci.

Pour confirmer ces constats, le Tableau 1.2 a été réalisé. Celui-ci reprend une analyse statistique d'échantillons de l'aquifère réalisée à l'aide de "Réseau" ainsi qu'une autre base de données distribuée par la DGP, "PROGRES". Leur combinaison a demandé un filtrage des données redondantes. Dans le cas où un même ouvrage avait été échantillonné plus d'une fois, l'analyse la plus récente était conservée. Ensuite, les analyses chimiques portant une balance ionique plus grande que 8% ont été supprimées pour garder les échantillons cohérents.

Les 132 analyses chimiques ont alors permis d'identifier les caractéristiques de l'aquifère. De manière générale, des valeurs médianes présentent une minéralisation modérée attendue. Cependant, les concentrations moyennes étant beaucoup plus élevées que les médianes, des formes de contamination peuvent être présente. Des valeurs maximales importantes en chlore et conductivité pourraient être expliquées par des intrusions d'eau salée tandis que des concentrations élevées en nitrates pourraient être causées par une action anthropique, soit liée à une mauvaise gestion des eaux usées comme ont pu le montrer Faye et al. (2019) dans la région de Thiaroye, soit à une exploitation agricole trop agressive. Il est à noter que la norme de potabilité pour les nitrates est de 50 mg/L selon l'OMS (DGP, 2020).

	pH	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	Fe
Minimum	6	1,5	0,2	3,2	0,4	0,1
Médiane	6,6	20	5,1	33,6	1,9	0,5
Moyenne	6,5	30	8,6	42,9	2,8	2
Maximum	7,1	176	113	269,8	21	23,6
	Conductivité [$\mu S/m$]	Cl^{-}	SO_4^{2-}	HCO_3^{-}	NO_3^{-}	F^{-}
Minimum	102	7	0,1	9,2	0	0,01
Médiane	267	53,2	17,1	54,9	1	0,1
Moyenne	440	71	38,8	81,5	19,9	0,14
Maximum	3450	494	432	457,6	634	0,8

TABLE 1.2 – Analyse statistique de l'hydrochimie dans les sables du Quaternaire (en mg/L)

Les analyses chimiques ont ensuite été utilisées pour générer le diagramme de Piper (Figure 1.10) à l'aide du programme "Diagrammes" de Simler (2021).

Dans l'ensemble, les eaux ont un faciès chloruré sodique et potassique. Il est important de noter que les diagrammes de Piper n'ont aucune information quantitative mais se basent sur les proportions des ions majeurs. La carte 1.11 reprend la localisation des ouvrages étudiés pour réaliser le diagramme.

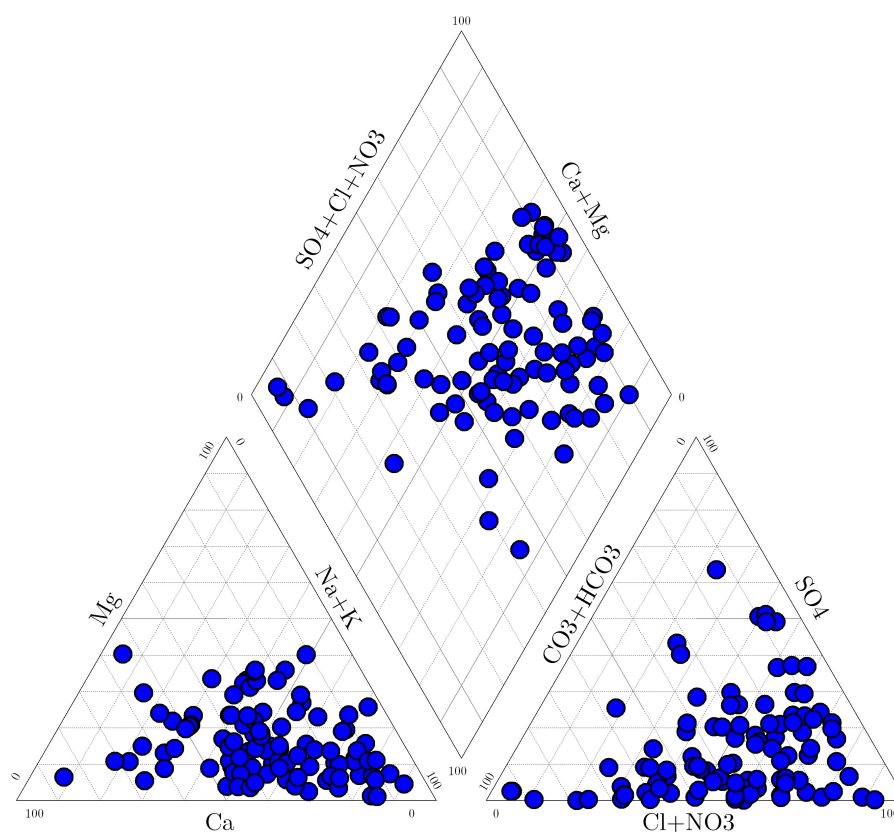


FIGURE 1.10 – Diagramme de Piper des sables du Quaternaire

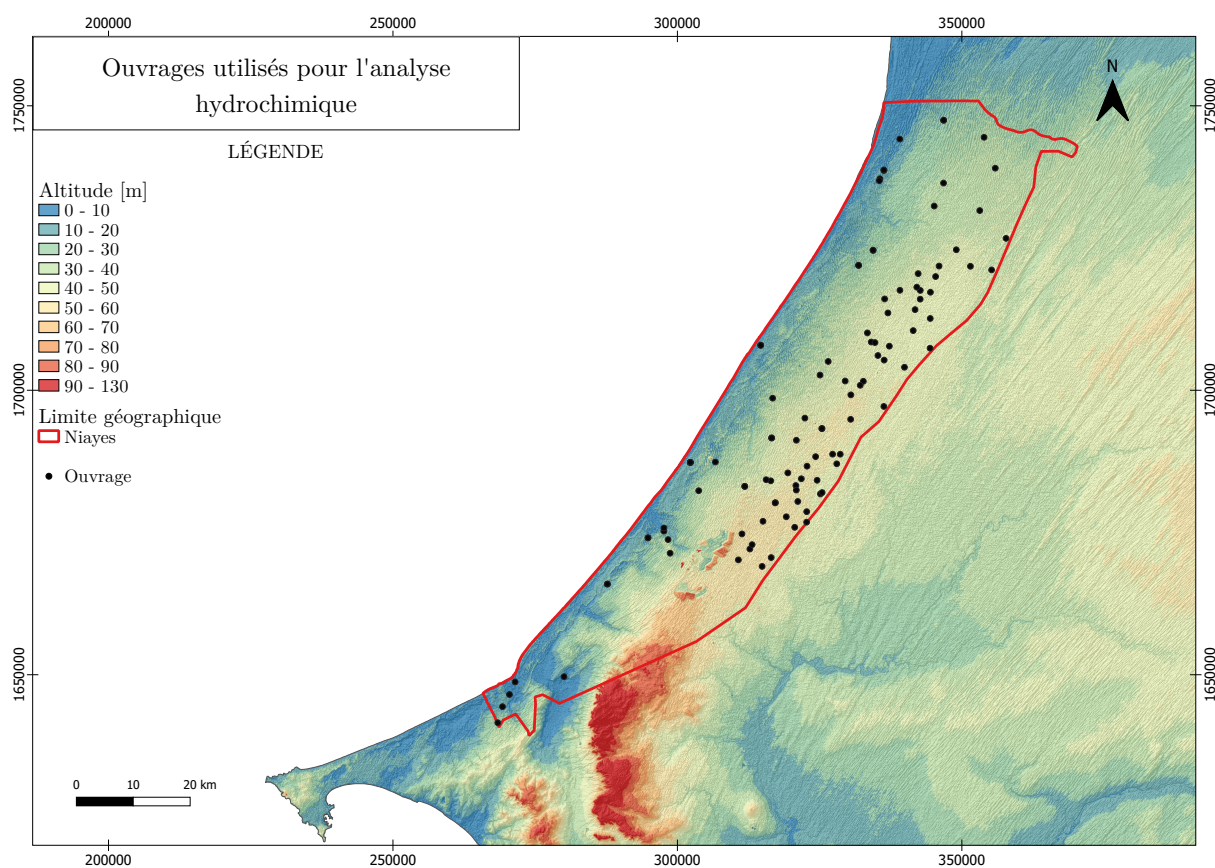


FIGURE 1.11 – Carte des ouvrages étudiés pour l'analyse hydrochimique

1.7.3 État de l'aquifère

Cette sous-section présente l'état de contamination de l'aquifère. En raison de l'importante activité agricole, deux groupes de contaminants sont considérés : les pesticides et les nitrates. Pour illustrer ces observations, la carte 1.12 a été réalisée.

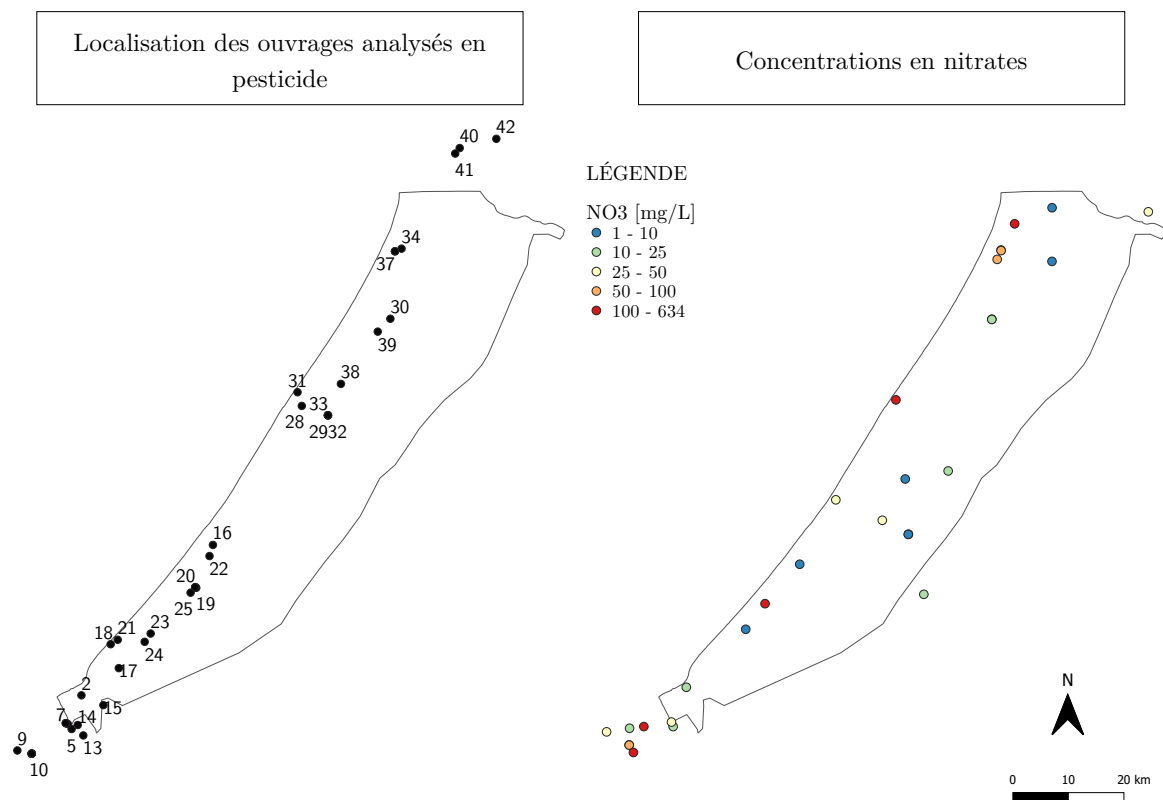


FIGURE 1.12 – Localisation des ouvrages analysés en pesticides et concentrations en nitrates

Contamination en pesticides

Le centre régional de recherches en écotoxicologie et sécurité environnementale (CERES) a réalisé deux campagnes d'échantillonnage de pesticides dans la région des Niayes entre 2016 et 2017. Ainsi, les puits et Niayes, le sol et les spéculations ont été analysées dans respectivement 30 et 45 villages, la plupart étant semblables dans une optique de suivi de qualité. Dix-neuf pesticides ont été recherchés :

- 7 organochlorés : Aldrine, DDT, Dicofol, Dieldrine, Endrine, Heptachlore et Lindane ;
- 5 organophosphorés : Chlorpyrifos, Malathion, Parathion, Profénofos et Diméthoate ;
- 7 pyréthrinoïdes : Bifenthrine, Cyperméthrine, Deltaméthrine, Esfenvalérate, Fenvalérate, λ -Cyhalothrine et Trifluraline.

En 2016, aucun échantillon d'eau ne présentait de pollution dépassant le seuil de l'OMS ($0,1 \mu\text{g/L}$ pour une matière active individuelle et $0,5 \mu\text{g/L}$ pour les mélanges). Des traces de λ -Cyhalothrine, Dicofol, DDT, Bifenthrine, Endrine, Chlorpyrifos, Lindane, Dieldrine, Malathion, Profénofos et Cyperméthrine. Il est important de noter que le Diméthoate n'avait pas été analysé pour les échantillons de 2016 alors qu'il s'agit de la molécule la plus observée l'année suivante.

En 2017, 15 Villages sur 45 ont révélé des échantillons d'eau pollués par au moins une matière active. Le Diméthoate est le pesticide le plus largement représenté mais aussi celui qui offre les concentrations les plus élevées (jusqu'à 23 fois plus élevée que la norme de potabilité en vigueur).

La Bifenthrine et le Dicofol polluent respectivement 3 et 2 échantillons d'eau avec des concentrations dépassant en moyenne 3 fois la valeur seuil.

Finalement, l'Endrine a aussi été observée lors de la campagne. Il s'agit d'un pesticide de la famillecatégorie des organochlorés, présentant des effets sur la santé plus importants que les autres catégories. Le pesticide est de plus considéré comme un Polluant Organique Persistant (POP), fortement réglementé par les conventions de Stockholm et Rotterdam (CERES et al., 2016 ; CERES, 2017).

Le Tableau 1.3 reprend les localités pour lesquelles des traces de pesticide ont été détectées à l'occasion de l'étude de 2017. Le numéro correspond à celui de la carte 1.12 afin d'identifier leur localisation. Il est à noter que cette campagne d'échantillonnage a été ciblée pour analyser des zones de culture, extrapoler ces résultats à l'échelle du bassin ne serait donc pas correct.

n.	Localité	Pesticide détecté	Concentration [$\mu\text{g/L}$]
3	Kayar	Diméthoate	1,9
6	Gorom	Diméthoate	2,3
8	Dène	Endrine	0,1
		Diméthoate	1,3
9	Kounoune	Diméthoate	0,9
14	Mbidiem	Diméthoate	0,4
20	Santhiou Ndong	Diméthoate	1,1
22	Mboro	Diméthoate	0,6
23	Notto	Diméthoate	0,6
24	Kéri	Bifenthrine	0,3
26	Darou Khoudoss	Diméthoate	0,6
31	Thiukougne	Diméthoate	0,4
33	Teureul	Diméthoate	0,8
35	Mouril	Diméthoate	1,6
40	Semelle	Diméthoate	1,6
		Bifenthrine	0,2
		Dicofol	0,3
42	Fass Ngom	Diméthoate	0,9

TABLE 1.3 – Pesticides détectés par CERES (2017)

Contamination en nitrates

La carte de concentrations en nitrates a été réalisée à partir des mêmes bases de données que celles précédemment décrites. Tous les échantillons possédant une analyse en NO_3 a été gardée, peu importe son résultat de balance ionique. Ensuite, seuls les analyses vieilles de moins de dix ans ont été gardées pour représenter au mieux l'état actuel de la nappe. Finalement, dans le cas d'analyses multiples pour un même ouvrage, la valeur maximale a été gardée pour représenter le cas le plus défavorable.

Les 25 ouvrages montrent des valeurs de concentrations assez dispersées. Comme annoncé précédemment, celles qui dépassent la norme de potabilité sont sûrement d'origine anthropique.

1.7.4 Exploitation des ressources

L'aquifère superficiel, grâce à son extension sur toute la zone d'étude, son épaisseur et sa grande conductivité hydraulique représente un important potentiel en eau souterraine. Cependant, l'évapotranspiration (qui serait efficace à plusieurs mètres de profondeur d'après la DGPRE (2020)), et dans une moindre mesure les transferts avec l'aquifère sous-jacents, peuvent réduire considérablement les débits d'exploitation en cas de sécheresse prolongée. C'est pourquoi les zones de cultures intensives connaissent des baisses de niveau piézométrique augmentant ainsi les risques de salinisation (DGPRE, 2020).

La carte 1.13 présente tous les ouvrages répertoriés par les différentes bases de données de la DGPRE et leurs utilités. La carte affiche tous les puits indépendamment de l'aquifère qu'ils exploitent, mais dans la zone des Niayes, seuls les puits dédiés à l'irrigation à l'ouest se situent dans les sables de Maastrichtien pour obtenir des débits plus élevés. Les autres ouvrages exploitent l'aquifère supérieur. Ponctuellement, les débits varient entre 5 et 100 m^3/h , pour une moyenne de 35 m^3/h (DGPRE, 2020). Il est important de noter que tous les puits existants ne sont pas repris sur la carte. Une exploitation beaucoup plus intense de l'aquifère est attendue.

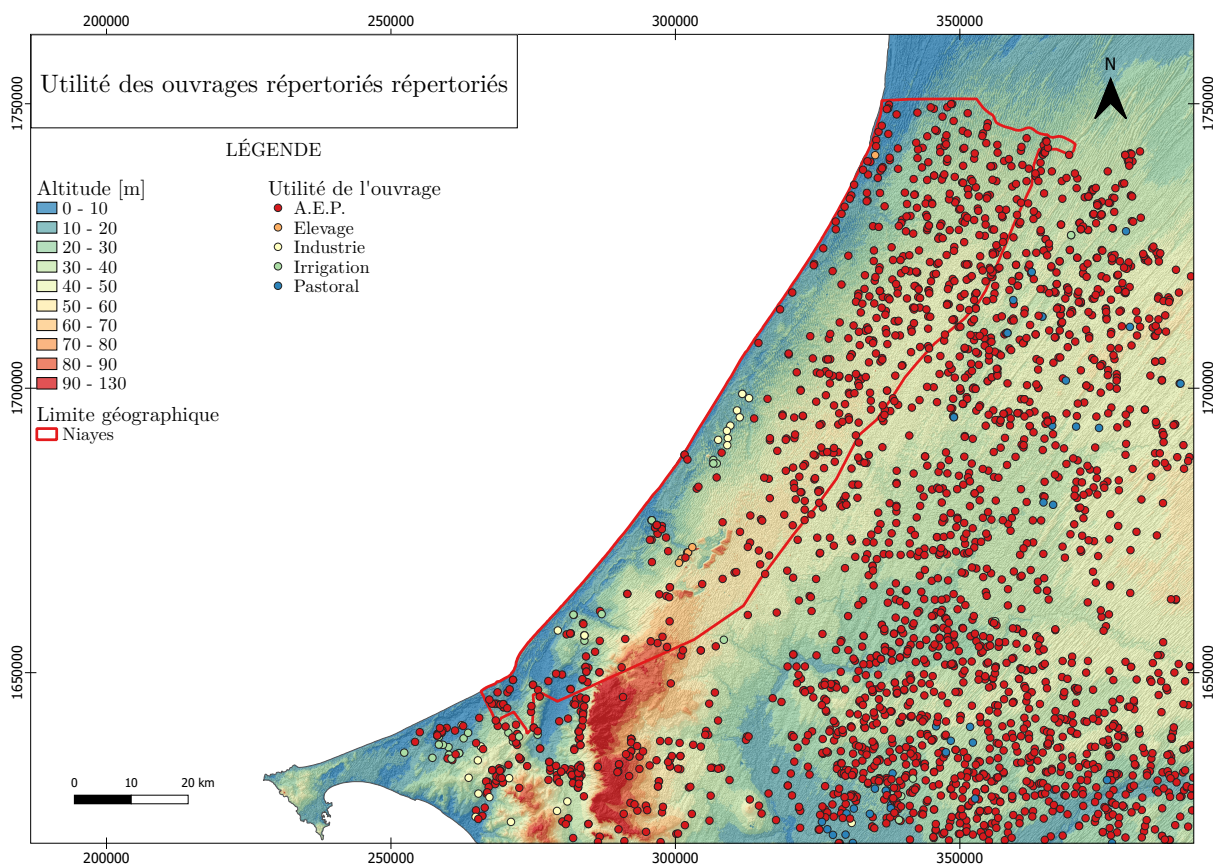


FIGURE 1.13 – Utilité des ouvrages répertoriés

Au total, 17 500 agriculteurs sont actifs dans la zone des Niayes. Ceux-ci ont en moyenne des terrains ne dépassant pas les 5000 m^2 (Ndiaye, 2018). L'utilisation importante de cet aquifère demande un suivi important afin d'éviter l'appauvrissement des ressources aussi bien au niveau quantitatif que qualitatif.

Chapitre 2

Vulnérabilité

En raison de leur localisation dans le sous-sol, les eaux souterraines bénéficient d'une protection naturelle. Si un aquifère vient à rencontrer une source de pollution, la gestion de celle-ci est cependant plus difficile à traiter. Il est donc important d'évaluer l'impact potentiel d'une contamination pour prendre les décisions adéquates.

Généralement, des zones de préventions sont délimitées en fonction du temps de transport d'une possible pollution à travers le milieu saturé. Cet aspect préventif a la qualité de gérer les possibles problèmes au niveau des captages, et donc de l'eau directement exploitée. Par contre, cette approche est moins adaptée aux formes de pollution diffuses et ne considère pas le pouvoir "atténuateur" des systèmes souterrains.

Une autre approche permet de représenter la capacité de l'aquifère à atténuer de manière naturelle une source de pollution à travers des mécanismes et processus physiques, chimiques et biologiques, diminuant ainsi sa vulnérabilité. Sur la base de ces résultats, les zones plus sensibles, qui nécessitent un suivi plus important, peuvent être identifiées.

La méthode de caractérisation $APS\hat{U}$ est utilisée dans ce travail. Basée sur les grands principes du programme européen COST Action 620, celle-ci a été développée par l'Uliège dans une convention avec la Région wallonne afin de caractériser de manière cohérente et unique la vulnérabilité pour protéger les eaux souterraines (Popescu et al., 2004).

D'autres études de vulnérabilité ont déjà été réalisées dans les Niayes (DGPRES, 2020 ; Diop Thioune et al., 2019 ; Roger et al., 2009). Celles-ci utilisent généralement l'approche DRASTIC, une méthode empirique qui peut faire l'objet d'un choix de coefficients subjectifs. Il peut alors être difficile d'interpréter physiquement les résultats ou de les comparer avec d'autres études.

La méthode $APS\hat{U}$, quant à elle, repose de manière univoque sur les principes physiques gouvernant la mobilité de l'eau et des contaminants dans le sous-sol (Popescu et al., 2004).

Ce chapitre décrit dans un premier temps les concepts et notions à la base d' $APS\hat{U}$. Dans un second temps, son application au niveau de la nappe superficielle des sables quaternaires est présentée. Ce chapitre est basé sur les travaux de Popescu et al. (2004 et 2019), Thomas et al. (2004) et Dollé et al. (2004)

2.1 Conceptualisation de la méthode

2.1.1 Types de vulnérabilité

Depuis l'introduction du terme de "vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination" par Margat en 1960, trois types de vulnérabilité peuvent être distingués :

- La vulnérabilité intrinsèque : Elle reflète la capacité du milieu à atténuer naturellement tout contaminant indépendamment de son type, de sa quantité ou de son introduction (diffuse ou ponctuelle). Elle repose uniquement sur les caractéristiques de la zone d'étude à travers ses caractéristiques géologiques, géographiques, hydrologiques et hydrogéologiques. C'est cette vulnérabilité qui sera étudiée dans ce chapitre.
- La vulnérabilité spécifique : En plus de l'analyse précédente, celle-ci prend en compte les interactions chimiques, physiques et microbiennes possibles entre le milieu souterrain et le contaminant.
- Le risque : Au delà du concept de vulnérabilité, le risque tient compte des différents scénarios possibles de contamination et de leurs conséquences. Il étudie donc non seulement la dégradation d'une contamination fictive, mais aussi les possibles pressions et récepteurs existant en surface.

2.1.2 Vulnérabilité de la ressource - Vulnérabilité de la source

L'approche développée est basée sur un modèle "Émetteur-Trajet-Récepteur". L'émetteur est l'endroit d'occurrence de la pollution de surface. Le récepteur est l'objectif à protéger. Si celui-ci est l'aquifère dans son ensemble, il sera question de vulnérabilité de la ressource. Dans le cas où il s'agit d'un captage en particulier, il sera question de vulnérabilité de la source. Finalement, le trajet représente le cheminement du contaminant entre la surface et le récepteur. L'étude menée ici caractérise la vulnérabilité intrinsèque de la ressource. Le trajet se fait donc principalement verticalement entre la surface et la zone saturée.

2.1.3 Temps, durée et ampleur de la contamination

Comme cité précédemment, la méthode est basée sur des critères physiques objectifs et quantifiables. Pour ce faire, elle répond à trois questions décrivant l'ampleur de la possible contamination infiltrée.

- Combien de temps a mis le polluant pour atteindre la nappe (t_0) ?
- Quel est le niveau maximal de pollution rencontré (C_{max}) ?
- Pendant combien de temps la pollution a-t-elle été présente dans l'aquifère (d) ?

L'influence des trois variables est présentée Figure 2.1. La contamination sera d'autant plus importante que t_0 est faible et C_{max} et d sont élevés.

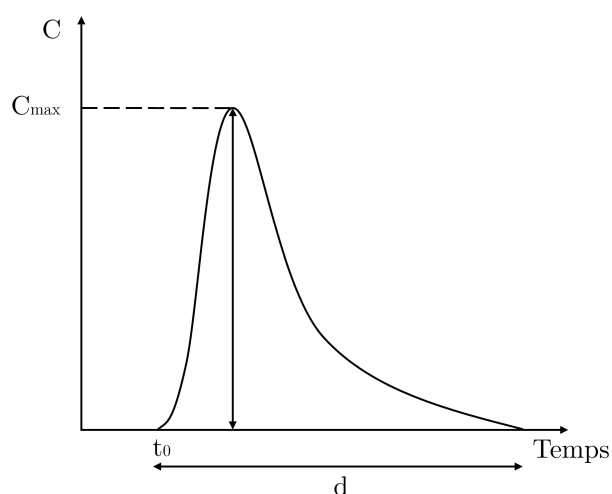


FIGURE 2.1 – Critères sélectionnés pour évaluer la vulnérabilité de la ressource d'après Brouyère et al. (2001)

2.1.4 Infiltration - Ruissellement

Avant que la source de pollution ne s'infiltré, celle-ci peut ruisseler, voire s'écouler jusqu'à l'exutoire sans entrer en contact avec l'aquifère. Dans ce cas, le danger sur la ressource diminue sensiblement. Le scénario d'infiltration peut donc grandement influencer les résultats du modèle¹ (Figure 2.2). Deux concepts doivent alors être introduits.

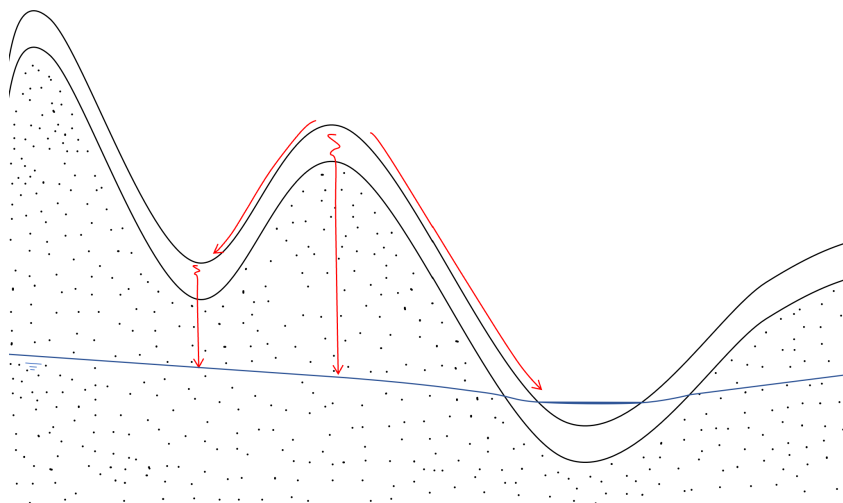


FIGURE 2.2 – Mobilité d'un polluant à la surface et dans la zone saturée

Dangerosité potentielle (DP) et dangerosité réelle (DR)

– La dangerosité potentielle représente l'impact possible d'une unité de pollution introduite en un point sans prendre en compte l'atténuation du milieu souterrain. Il s'agit d'un nombre compris entre 1 et 0 représentant la proportion de polluant infiltrée dans la zone d'étude. Dans le cas extrême où tout le contaminant ruissellerait sur une surface imperméable jusqu'à l'exutoire, sa valeur serait de 0. À l'inverse, si tout le polluant venait à s'infiltrer dans le bassin, la dangerosité potentielle serait de 1.

– La dangerosité réelle, en revanche, prend en compte la capacité du milieu à atténuer la pollution de manière naturelle. La méthode étudiant la vulnérabilité intrinsèque, la dégradation ou les réactions chimiques spécifiques ne sont pas pris en compte. Les phénomènes physiques de dilution, dispersion et effets d'eau immobile sont toutefois considérés. Il vient alors

$$0 \leq DR \leq DP \leq 1 \quad (2.1)$$

Dangerosité directe (DD) et latérale (DL)

– La dangerosité directe représente la proportion de polluant qui s'infiltré en sa source.

– La dangerosité latérale est la proportion de contaminant qui va s'infiltrer latéralement au cours de son ruissellement.

Les deux concepts peuvent alors s'associer pour différencier la quantité de polluant qui s'infiltrera directement depuis la source (la dangerosité potentielle directe, DPD) et la proportion de polluant qui va s'infiltrer plus loin tout en restant dans la zone d'étude (la dangerosité potentielle latérale, DPL).

1. L'aquifère est drainant dans les dépressions dunaires selon Faye (2017).

2.2 Mise en place de la méthode

L'objectif d' $APS\hat{U}$ est de prendre en considération les effets de surface (ruissellement-infiltration) et de profondeur (atténuation naturelle) de la manière la plus cohérente possible. La zone d'étude est alors divisée en cellules pour obtenir une valeur de vulnérabilité totale en tout point i . La prise en compte des effets de profondeur et de surface dans la méthode de calcul est présentée ci-dessous.

2.2.1 Effets de profondeur : atténuation naturelle

Le pouvoir "auto-réparateur" de l'aquifère dépend majoritairement du temps de transfert dans la partie non saturée du sous-sol. Pour représenter ce cheminement, l'équation de transfert en une dimension pour un pulse de contaminant conservatif sera simulée pour tout i . Cette équation peut s'écrire :

$$\frac{\partial n_e C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial C}{\partial z} - v_e \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (2.2)$$

Avec,

n_e , la porosité efficace [-]

v_e , la vitesse effective [m/s]

C , la concentration en contaminant [mg/L]

z , la distance de parcours [m]

$D = v_e \alpha_L$, le coefficient de dispersion [m^2/s]

α_L , la dispersivité longitudinale [m]

Les valeurs de temps de transfert, durée et ampleur de contamination peuvent alors être calculées pour chaque cellule à travers la ou les couche(s) comprise(s) entre la source et la nappe.

2.2.2 Effets de surface : ruissellement

Deux données sont nécessaires pour obtenir les valeurs de dangerosité potentielle directe et latérale :

- Les coefficients de ruissellement et d'infiltration de chaque cellule. Ces coefficients dépendent de la pente, de l'occupation du sol ainsi que du type de sol. Les valeurs de coefficients de ruissellement selon Ebener (2000) et ajusté d'après Mallants & Feyen (1990) sont disponibles Tableau 2.1.
- Le voisinage η_i relatif à chaque point comprenant la liste des cellules influencées par une source de pollution originaire de i . Celles-ci dépendent des coefficients de ruissellement et des directions d'écoulement.

Ainsi, pour chaque cellule, il est possible de calculer la proportion de polluant entrant dans chaque case de son voisinage. La dangerosité potentielle totale est ensuite obtenue selon :

$$DP_i = CI_i + \sum_{j=1}^{\eta_i} DPL_i^j \quad (2.3)$$

	Pente [%]	Sol absent	Sables	Sables limoneux	Limons sableux	Limon	Limon lourd	Limons argileux	Sables limono-argileux	Limon argileux	Argile limoneuse	Argile sableuse	Argile lourde	Argile lourde sableuse	Sol imperméable
Forêts	<0,5	0	0,03	0,07	0,1	0,13	0,17	0,2	0,23	0,27	0,3	0,33	0,37	0,4	1
	0,5-5	0	0,12	0,13	0,15	0,17	0,19	0,22	0,25	0,28	0,32	0,36	0,4	0,45	1
	5-10	0	0,28	0,26	0,25	0,25	0,25	0,27	0,29	0,32	0,35	0,39	0,44	0,5	1
	>10	0	0,23	0,27	0,3	0,33	0,37	0,4	0,43	0,47	0,5	0,53	0,57	0,6	1
Pâturages	<0,5	0	0,03	0,07	0,1	0,13	0,17	0,2	0,23	0,27	0,3	0,33	0,37	0,4	1
	0,5-5	0	0,07	0,09	0,12	0,15	0,18	0,21	0,24	0,28	0,32	0,36	0,4	0,45	1
	5-10	0	0,15	0,15	0,16	0,18	0,2	0,23	0,27	0,31	0,36	0,42	0,48	0,55	1
	>10	0	0,2	0,21	0,22	0,24	0,26	0,29	0,33	0,37	0,42	0,47	0,53	0,6	1
Cultures	<0,5	0	0,23	0,27	0,3	0,33	0,37	0,4	0,43	0,47	0,5	0,53	0,57	0,6	1
	0,5-5	0	0,27	0,31	0,34	0,37	0,41	0,44	0,47	0,51	0,54	0,57	0,61	0,64	1
	5-10	0	0,33	0,37	0,4	0,43	0,47	0,5	0,53	0,57	0,6	0,63	0,67	0,7	1
	>10	0	0,45	0,49	0,52	0,55	0,59	0,62	0,65	0,69	0,72	0,75	0,79	0,82	1
Sol nu	<0,5	0	0,33	0,37	0,4	0,43	0,47	0,5	0,53	0,57	0,6	0,63	0,67	0,7	1
	0,5-5	0	0,37	0,41	0,44	0,47	0,51	0,54	0,57	0,61	0,64	0,67	0,71	0,74	1
	5-10	0	0,43	0,47	0,5	0,53	0,57	0,6	0,63	0,67	0,7	0,73	0,77	0,8	1
	>10	0	0,55	0,59	0,62	0,65	0,69	0,72	0,75	0,79	0,82	0,85	0,89	0,9	1

TABLE 2.1 – Valeurs des coefficients de ruissellement (Ebener, 2000)

2.2.3 Calcul de vulnérabilité

Afin d'obtenir une indication de la vulnérabilité en tout point de l'aquifère, $APS\hat{U}$ simule une source de pollution pour chaque cellule. Le contaminant va alors soit s'infiltrer, soit ruisseler dans le périmètre défini par η_i . Pour chaque cellule de ce voisinage, le transport unidimensionnel vertical d'un pulse de polluant conservatif sera modélisé. Les valeurs de d , t_0 et C_{max} sont alors disponibles pour chaque cellule du voisinage, représentant un scénario différent de pollution.

Il est alors nécessaire de prendre en compte toutes ces valeurs pour représenter de manière globale la dangerosité du point i pour la ressource en eau. Une méthode sécuritaire serait alors de choisir les valeurs les plus élevées parmi celles calculées. Cependant, cette manière de procéder ne tient pas compte des flux de polluants associés à chaque trajet. Par exemple, il est possible que la case reprenant le temps de transfert le plus court ne concerne qu'un faible pourcentage de la masse totale infiltrée.

La pondération des trois critères par les coefficients de dangerosité directe et latérale est donc favorisée. Celle-ci permet la prise en compte de la distribution des flux à travers les facilités d'infiltration associées à chaque cellule. Cette méthode permet ainsi d'obtenir, pour tout i , un temps de transfert équivalent $\widehat{t_i}$, une durée de contamination équivalente $\widehat{d_i}$ et une concentration maximale équivalente $\widehat{C_{max,i}}$:

$$\widehat{t_i} = DPD_i \times t_i + \sum_{j=1}^{\eta_i} DPL_i^j \times t_j \quad (2.4)$$

$$\widehat{d_i} = DPD_i \times d_i + \sum_{j=1}^{\eta_i} DPL_i^j \times d_j \quad (2.5)$$

$$\widehat{C_{max,i}} = DPD_i \times C_{max,i} + \sum_{j=1}^{\eta_i} DPL_i^j \times C_{max,j} \quad (2.6)$$

Cette méthode de pondération semble cohérente. En effet, si l'infiltration directe est maximale, les valeurs associées sont relatives aux conditions du sous-sol au même point. Au contraire, si la contamination ruisselle avant d'entrer dans le sous-sol, la méthode permet de prendre en considération les différents flux capables d'atteindre la nappe et leurs caractéristiques hydrogéologiques relatives.

2.2.4 Cartes de vulnérabilité

Avec ces valeurs équivalentes, trois cartes selon la vulnérabilité en termes de transfert V_t , de durée V_d et de niveau de pollution V_c sont générées.

En vue de tracer une unique carte de vulnérabilité, il est possible de combiner ces trois informations à l'aide d'une analyse multicritère. L'indice final de vulnérabilité peut être calculé selon :

$$V = \alpha V_t + \beta V_d + \gamma V_c \quad (2.7)$$

avec $\alpha + \beta + \gamma = 1$

2.3 Application à la zone des Niayes : Préparation du modèle

Les concepts introduits et la méthode de calcul présentée, l'application d' $APS\hat{U}$ sera discutée dans les sections suivantes : d'abord, par le biais de la préparation des différentes couches SIG nécessaires, et ensuite, via les résultats et différentes cartes de vulnérabilité calculées.

La section 2.1 a brièvement présenté les paramètres influençant le modèle. Ceux-ci peuvent être divisés en deux catégories : les paramètres relatifs à l'activité en surface et les paramètres relatifs à l'activité en profondeur. La liste des couches SIG de résolution 30x30 mètres préparées sont alors :

Activité en surface

- Modèle numérique de terrain ;
- Carte des pentes ;
- Carte de directions d'écoulement ;
- Carte d'occupation des sols ;
- Carte des types de sols.

Activité en profondeur

- Carte de recharge de l'aquifère ;
- Cartes lithologique des couches modélisées ;
- Cartes d'épaisseurs des couches jusqu'à la zone saturée.

2.3.1 MNT, cartes de pentes et de directions d'écoulement

À partir du modèle numérique de terrain, les cartes d'écoulement et de pente ont pu être obtenues. Pour ce faire, les fonctions "Fill sinks (Wang & Liu)" et "slope" de QGis ont été utilisées.

Il a ensuite été possible de faire correspondre chaque cellule à une classe de pente (de 1 à 4 selon le Tableau 2.1) et de directions d'écoulements (Tableau 2.3) pour réaliser la Figure 2.3. Par exemple, si l'écoulement se fait vers le Nord, la cellule X portera la valeur 64.

32	64	128
16	X	1
8	4	2

TABLE 2.2 – Valeurs de direction d'écoulement d'après Popescu et al. (2004)

Les pentes sont généralement douces avec quelques variations au niveau des zones de dunes plus importantes. De plus, il est possible d'observer des pentes plus prononcées à Keur Morfal causées par l'exploitation de la mine de phosphates.

Les directions d'écoulement semblent dictées par les dunes de sable. En effet, l'orientation générale des ergs se dessine à travers les deux directions d'écoulement définies par les dépressions dunaires. Il semblerait qu'au sommet de celles-ci, l'eau s'écoule soit dans une direction, soit dans sa direction opposée.

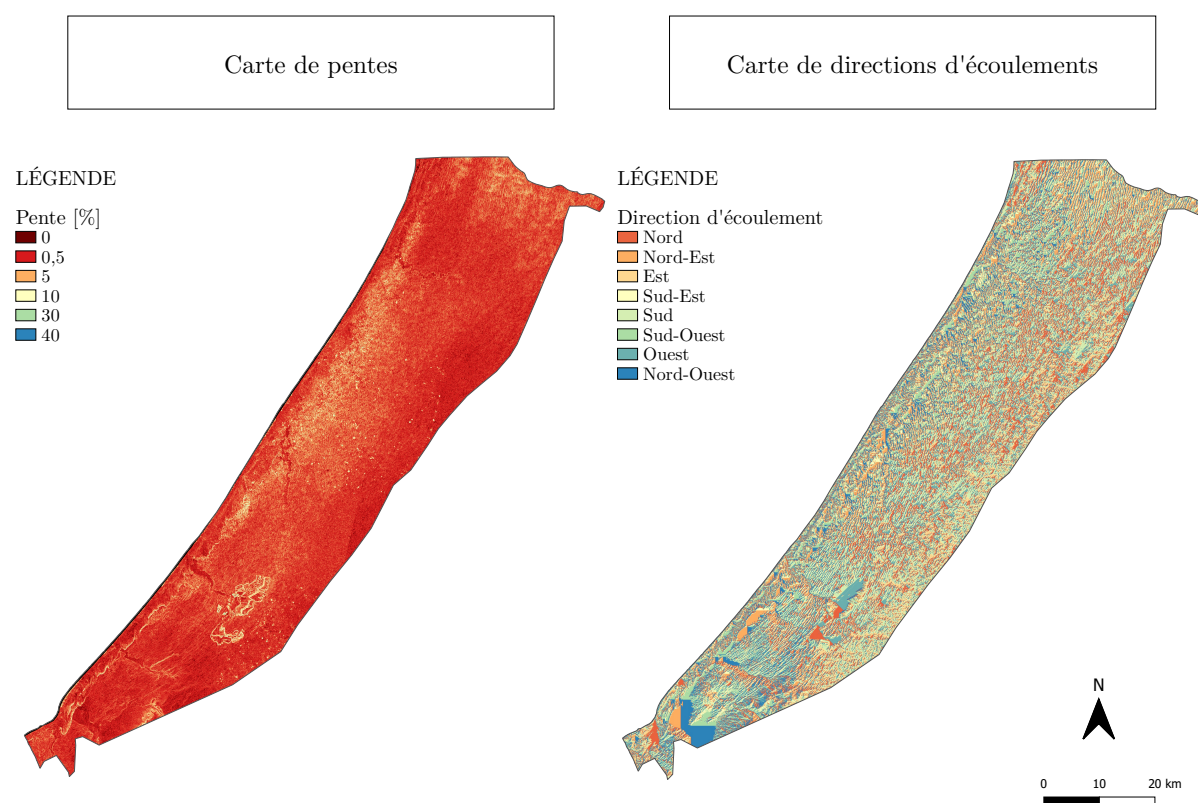


FIGURE 2.3 – Carte de classification de pentes et de directions d'écoulement générées par QGis sur la base du modèle numérique de terrain de JAXA

2.3.2 Carte d'occupation des sols

La carte d'occupation des sols a été réalisée grâce aux données de l'agence spatiale européenne (ESA). Dans le cadre de la "Climate Change Initiative" (CCI), la branche Copernicus de l'ESA dédiée à l'observation de l'environnement offre des données d'analyse satellite à l'échelle mondiale (Copernicus, 2021a). À partir d'images satellites multispectrales, il a été possible de classifier les occupations du sol selon le type d'activité et de végétation présent en surface avec une résolution de 300 mètres (Defourny et al., 2017). La version de 2019 a été téléchargée directement sur le site européen et la carte est disponible Figure 2.4 (Copernicus, 2021b).

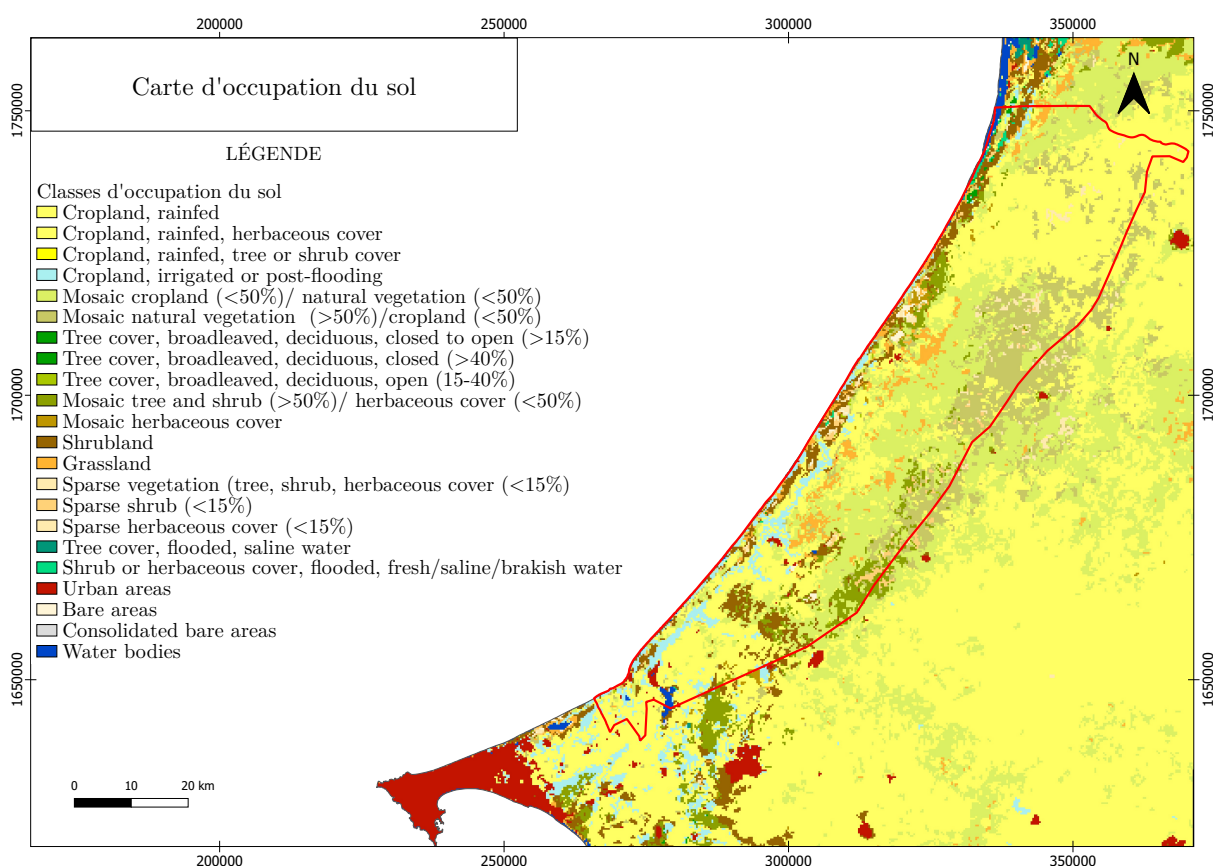


FIGURE 2.4 – Carte d'occupation du sol d'après Copernicus (2021b)

De nombreuses classes sont différenciées par l'agence spatiale européenne. Le modèle utilisé ne comprend cependant que 4 classes différentes (Tableau 2.1) : sol nu, cultures, pâturages et forêts. Chaque occupation de sol va plus ou moins retenir l'eau, notamment en fonction de sa couverture végétale. Ainsi, les forêts auront des coefficients de ruissellement plus faibles que les sols nus.

Il a donc été nécessaire de simplifier la carte 2.4. Les zones urbaines, dépourvues de toute végétation, ont été remplacées par des sols nus. Le reste des simplifications ont été réalisées selon le type de végétation ainsi que sa proportion. Le résultat est présenté Figure 2.5.

La zone d'étude semble être couverte majoritairement par des cultures. D'après la Figure précédente, ces cultures sont arrosées de manière naturelle par les pluies et présentent des couvertures herbacées ou broussailleuses, ce qui semble représentatif de la zone d'étude.

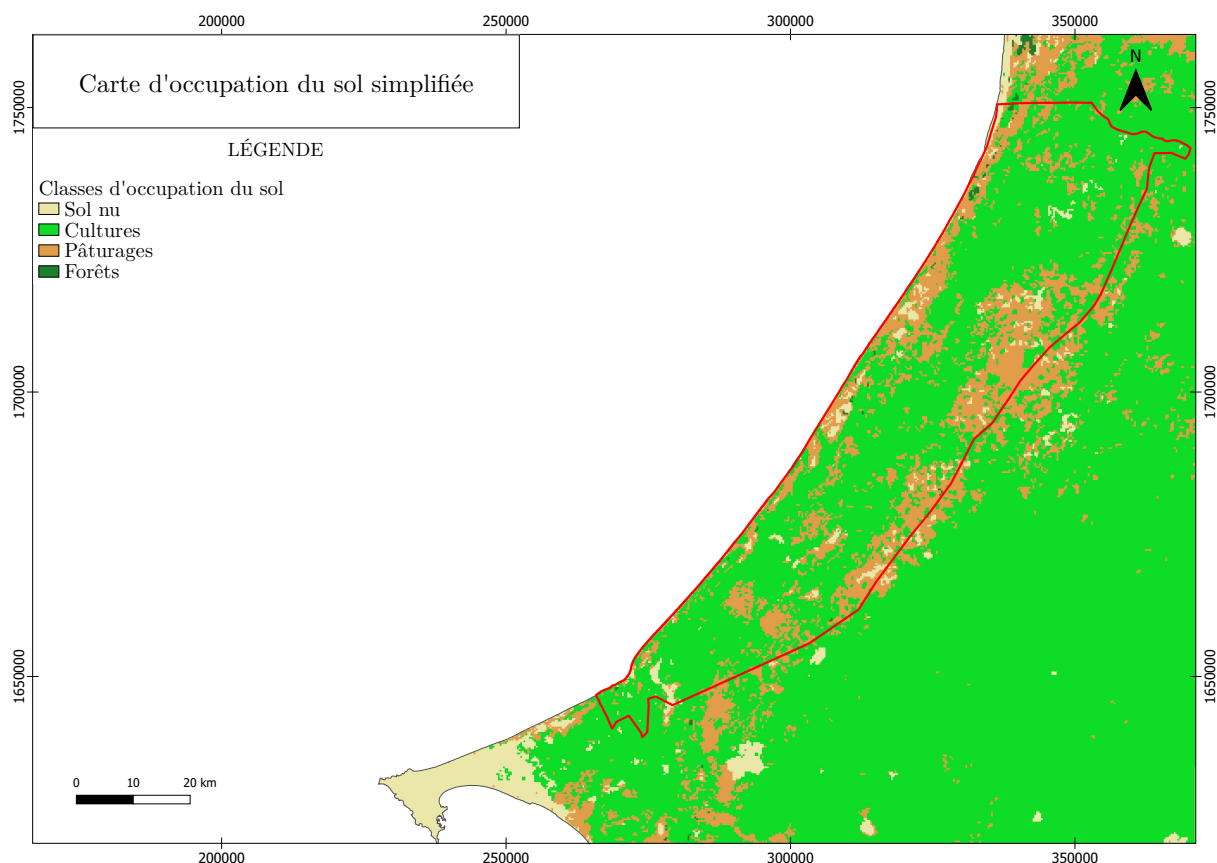


FIGURE 2.5 – Carte d'occupation du sol simplifiée

2.3.3 Carte pédologique

Comme présenté dans l'introduction, la carte des sols découle de la HWSD. Cette base de données met à disposition des informations pédologiques pour tous les sols à l'échelle mondiale.

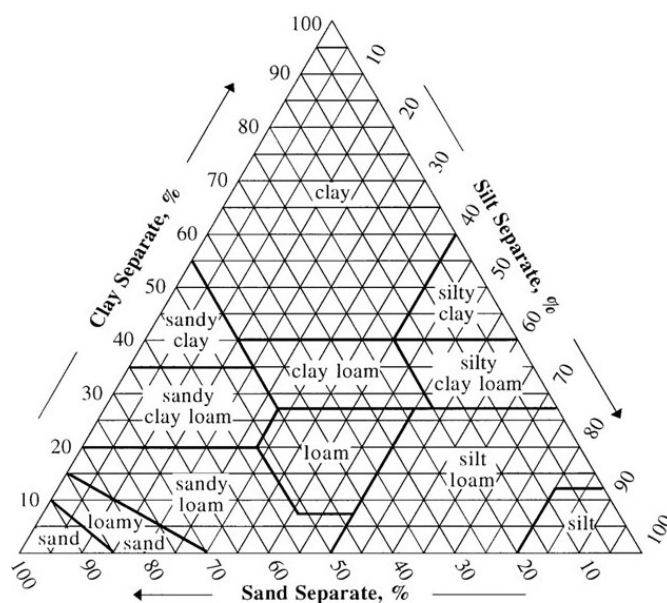


FIGURE 2.6 – Classification américaine de texture du sol (USDA, 1987)

Le Tableau 2.1 est basé sur la classification belge des types de sol comprenant 14 classes. La base de données utilisée, en revanche, caractérise les sols selon la classification du département de l'agriculture américaine, USDA (Figure 2.6).

Cependant, la base de données mondiale propose aussi les teneurs en sable, limon et argile pour chaque sol (Figure 2.7). À partir de ces valeurs et de la classification américaine, la carte des sols a pu être mise à jour pour correspondre au modèle belge (Figure 2.8).

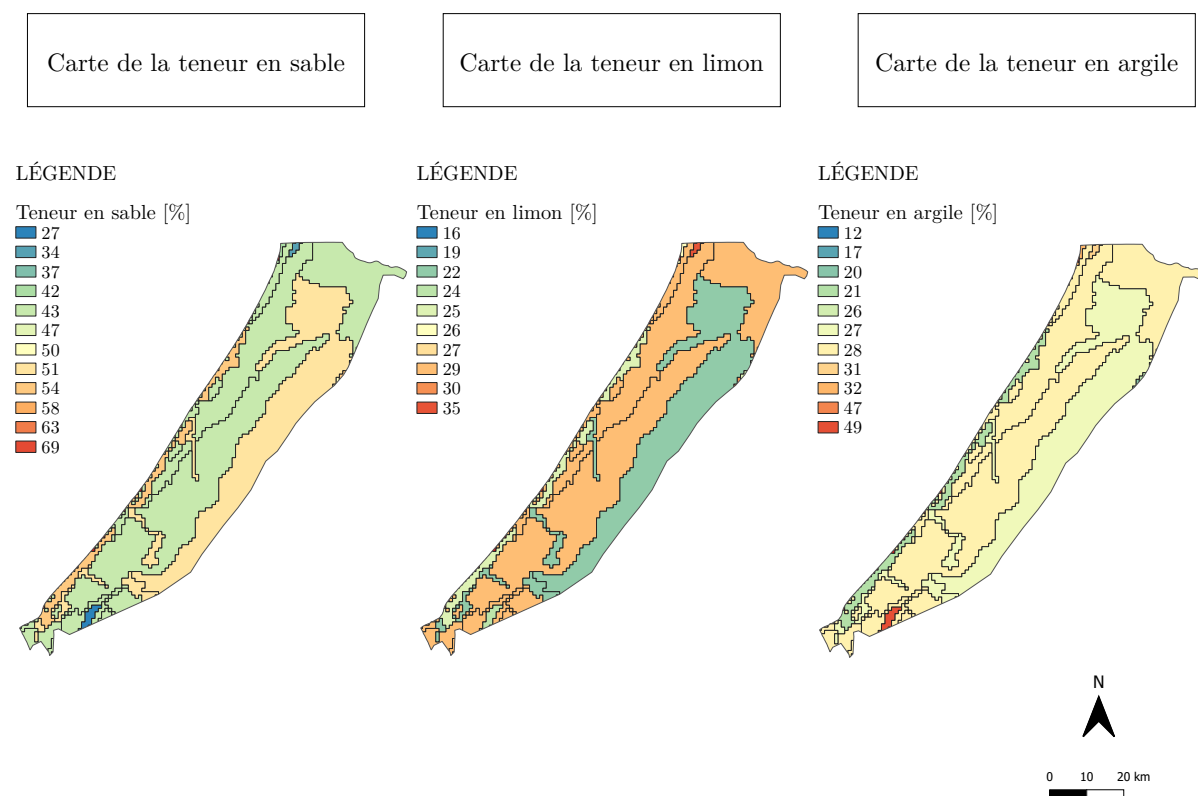


FIGURE 2.7 – Carte de composition en sable, limon et argile dans les sols

Selon le nouveau modèle, deux types de sols représentent la quasi totalité des sols des Niayes : les limons argileux et les sables limono-argileux.

Les limons argileux

Les limons argileux correspondent aux leptosols, fins et peu profonds, ils sont le résultat d'une latérisation (Roger et al., 2009). Il s'agit de sols composés de moins de 50% de sables, environ 29% de limons et 28% d'argiles.

Les sables limono-argileux

Les sables limono-argileux correspondent aux luvisols, des sols légèrement plus grossiers avec une composition de plus de 50% de sables, 25% de limons et 20% d'argiles. Ces sols ont des épaisseurs d'un mètre et sont donc sensiblement plus profonds que les limons argileux.

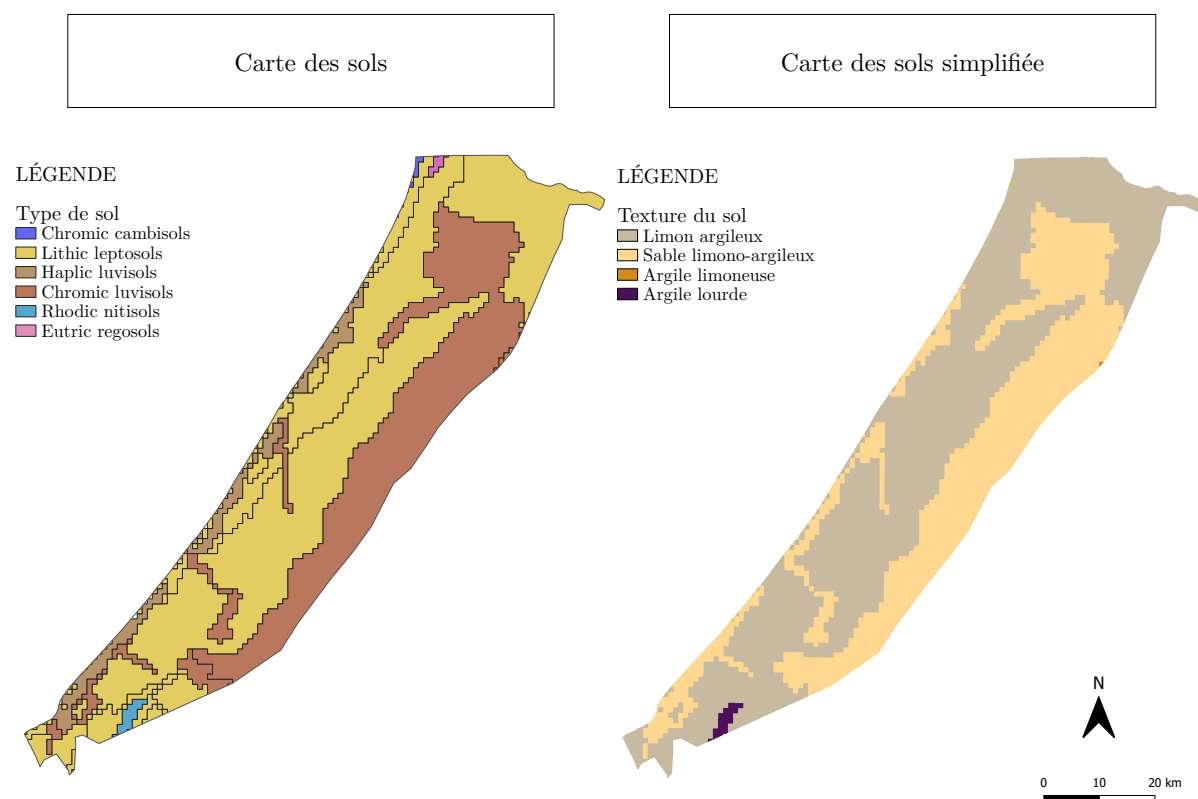


FIGURE 2.8 – Carte pédologique mise à jour selon la classification des sols belge

2.3.4 Carte de coefficients de ruissellement

Avec les pentes, l'occupation du sol et les types de sols, il est possible d'obtenir les coefficients de ruissellement et d'infiltration d'après le Tableau 2.1 d'Ebener (2000) ajusté d'après Mallants & Feyen (1990). La proportion d'eau s'infiltrant (CI) dans le sol est calculée à partir de la proportion d'eau qui ruisselle (CR) pour chaque cellule grâce à

$$CI = 1 - CR \quad (2.8)$$

Les résultats sont présentés Figure 2.9. Les classes choisies sont basées sur cinq classes de quantiles pour représenter au mieux les tendances générales de la carte.

Au final, il semble que l'occupation du sol et la pédologie influencent plus le modèle que la morphologie. Les pentes généralement douces ou importantes uniquement de manière ponctuelle dans les dunes ne permettent pas d'influencer les résultats de manière visible comme dans un bassin-versant avec une vallée abrupte par exemple.

Deux régions peuvent être distinguées : une zone longeant la côte et à l'extrémité de la zone d'étude et une zone concentrée sur le centre. La première semble reposer sur des sols plus grossiers et occupés par des pâturages. Ces deux paramètres font d'elle une zone d'infiltration beaucoup plus importante que la zone centrale porteuse de sols plus fins et occupée par des cultures.

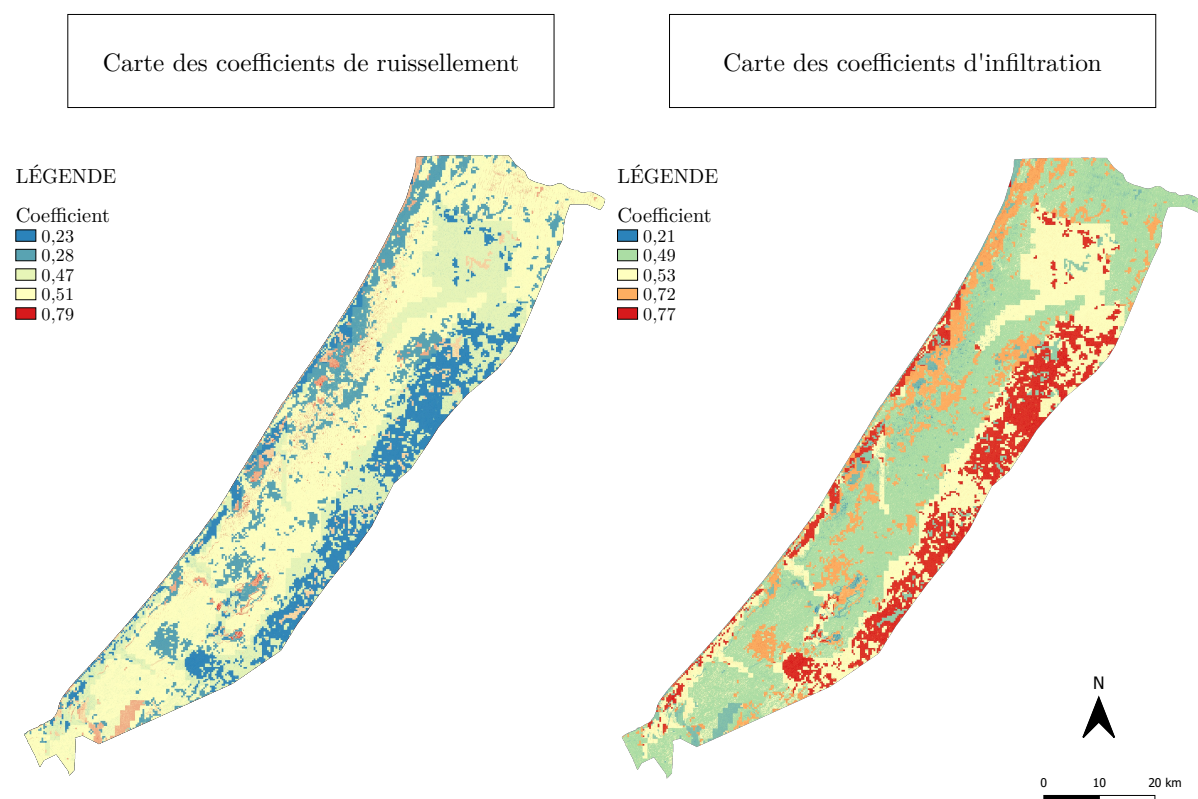


FIGURE 2.9 – Cartes de coefficients de ruissellement et d'infiltration

2.3.5 Carte de recharge en eau utile

Pour connaître la quantité d'eau s'infiltrant en chaque case, un bilan hydrologique simplifié a dû être réalisé. Pour ce faire, six types de données ont été téléchargés sur le site de la NASA "POWER" (Prediction Of Worldwide Energy Resources), mettant à disposition des données agro-climatiques de manière continue dans le temps et dans l'espace mesurées via satellites (NASA, 2021). Les six données journalières récupérées sont : les précipitations, la vitesse du vent à deux mètres du sol, l'humidité relative, les températures maximale et minimale et le rayonnement solaire incident. Les valeurs ont été téléchargées pour l'année 2019 car elle représente une année climatique typique, contrairement à l'année 2020 qui a connu une pluviométrie abondante (WWO, 2021).

En s'appuyant sur ces données, l'évapotranspiration potentielle a été calculée à l'aide de la dernière version du programme "ET0 CALCULATOR" (Version 3.2). Ce programme développé par Dirk Raes, chercheur à la KU Leuven, en coopération avec la section "Land and Water" de la FAO, permet de calculer l'évapotranspiration potentielle journalière selon l'équation de Penman-Monteigh suivant la procédure mise en place par Allen et al. (1998).

Avec l'évapotranspiration potentielle et la pluviométrie journalière, il a finalement été possible de calculer l'évapotranspiration réelle ainsi que l'eau utile, élément essentiel pour le calcul de recharge en tout point du bassin. La méthode de calcul utilisée est basée sur celle de Thornthwaite ajustée pour simuler une vidange exponentielle du stock.

La marche à suivre présentée, deux questions se posent alors : Quelles données météorologiques et quelle valeur de stock utiliser ?

Choix de station météorologique

Pour répondre à la première question, cinq villages ont été choisis de manière à représenter au mieux la totalité de la zone d'étude (Figure 2.10).

L'évapotranspiration potentielle a alors été calculée pour chaque jeu de données. Les résultats sont présentés Figure 2.11 et comparés à la pluviométrie. Du nord au sud, celles-ci sont de 358, 337, 400, 400 et 474 mm sur l'année. L'évapotranspiration montre des différences plus importantes selon la localisation au cours du pic de la saison sèche. Pendant la mousson, l'humidité relative augmente et fait ainsi diminuer l'ETP alors presque constante sur toute la zone. Ce résultat est rassurant car c'est pendant cette période que la variation du stock est la plus importante et donc la plus sensible aux choix de modélisation. Si l'évapotranspiration potentielle est identique sur le bassin autour de la saison des pluies, le choix de la station météorologique risque de moins influencer les résultats de recharge en eau utile.

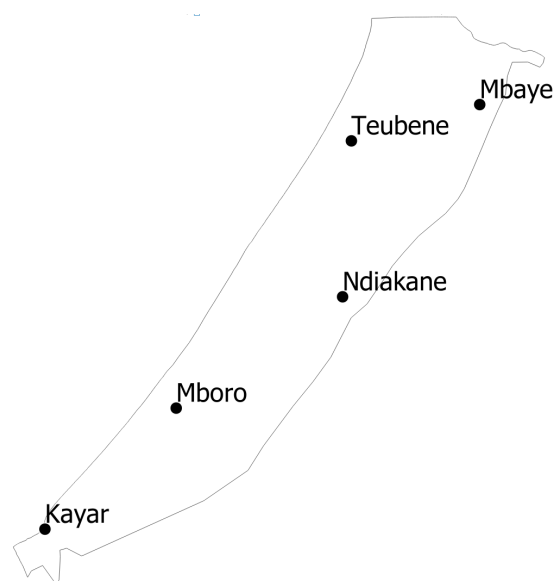


FIGURE 2.10 – Emplacements des stations étudiées

Les conditions climatiques de Mboro sont exploitées pour le calcul d'évapotranspiration réelle car elles semblent représenter au mieux l'ensemble de la zone des Niayes.

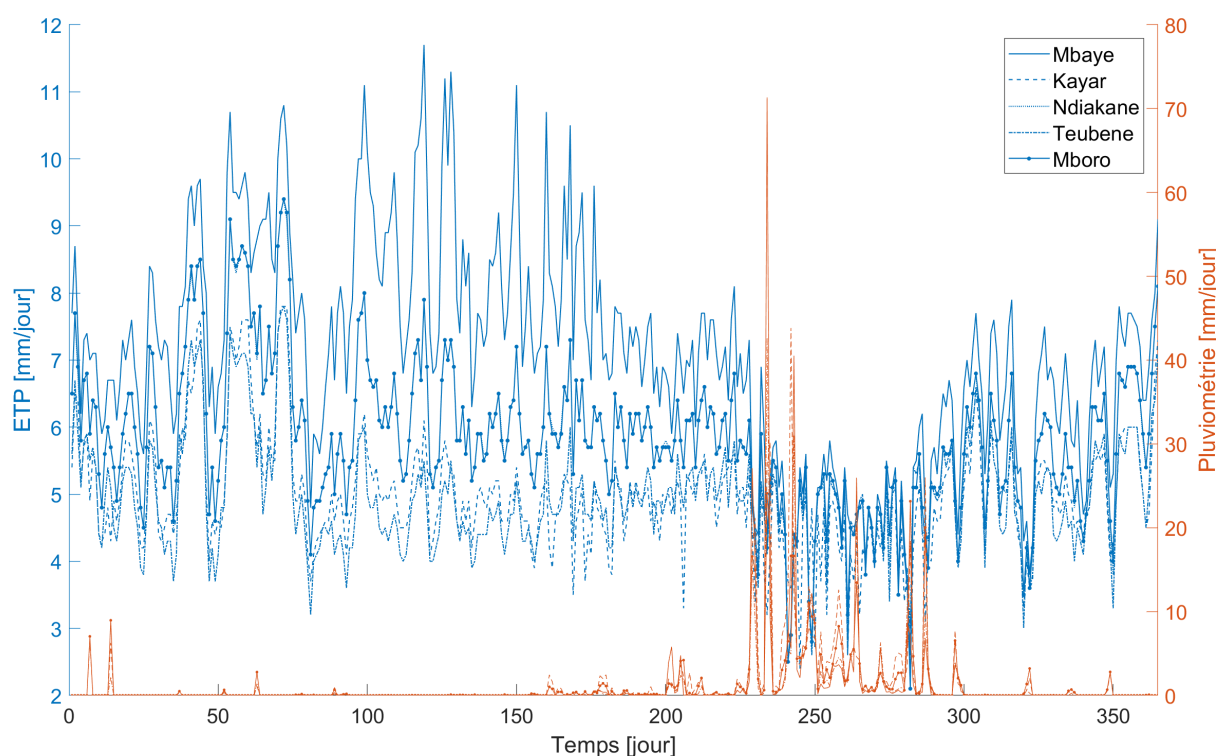


FIGURE 2.11 – Évapotranspiration potentielle et pluviométrie de cinq villages des Niayes

Choix de la valeur de stock

Le stock représente la quantité d'eau stagnant dans le sol avant d'être soit évaporée, soit infiltrée en profondeur. Le choix du volume va donc directement influencer la recharge. Lorsque celui-ci est élevé, une quantité d'eau plus importante est nécessaire pour saturer les sols et permettre un transfert vers l'aquifère. À l'inverse, si le stock diminue, les sols seront plus rapidement gorgés d'eau et la recharge sera plus importante.

Entre août et novembre, des pluies abondantes remplissent rapidement le stock tandis que le reste de l'eau constitue la recharge. Après cette période, le stock se tarit petit à petit.

La vidange modélisée se fait de manière exponentielle. Lorsque beaucoup d'eau est présente dans les sols, le stock en eau diminue assez rapidement. Par contre, une fois que celle-ci s'évapore, la vidange du stock se fait plus difficilement.

Le Tableau ci-dessous présente le résultat de l'eau utile totale sur l'année pour différents stocks.²

Valeur de Stock [mm]	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Eau utile [mm]	163	142	124	107	90	72	56	40	24	9	0

TABLE 2.3 – Résultats du calcul d'eau utile pour différentes valeurs de stock

Le caractère drainant des sables sous-jacents permet de considérer un stock relativement faible. Cependant, la reprise évapotranspiratoire semble pouvoir se faire jusqu'à des profondeurs importantes. En effet, grâce aux méthodes isotopiques (notamment le dosage du tritium), il a pu être établi que la reprise qu'on croyait limitée à quelques mètres sous le sol pouvait se faire jusqu'à plusieurs dizaines de mètres en profondeur (DGPRE, 2020).

Finalement, un stock de 50 millimètres a été considéré dans le cadre de ce travail. Une valeur de 72 millimètres sur l'année constitue ainsi l'eau utile moyenne en tout point. Dans le cadre d'une étude plus approfondie, une analyse des sols et de l'évapotranspiration y étant liée devrait cependant être prise en compte.

Pour diminuer le temps de calcul, le code regroupe les mailles en fonction de leurs caractéristiques hydrologiques. Ainsi, les mailles avec les mêmes classe de sol, occupation de sol, pente et eau utile sont regroupées sous une même Unité de Réponse Hydrologique (URH).

Le bilan hydrologique est calculé pour chaque URH donnant alors l'eau utile qui constitue la recharge en eau (infiltration efficace I_{eff}) au sein de chaque cellule,

$$I_{eff} = CI \times EU \quad (2.9)$$

Cette valeur d'infiltration efficace sera utilisée pour le calcul de flux d'infiltration Q_{rech} dans l'évaluation de la capacité d'atténuation. À l'aide de la formule de Darcy, cette valeur de flux permettra de calculer la vitesse effective d'écoulement du contaminant fictif après avoir été divisée par la porosité effective.

2. Les valeurs extrêmes représentées dans ce tableau ne sont pas réalistes, mais permettent de présenter l'évolution du modèle.

2.3.6 Épaisseur des couches géologiques

L'activité en surface modélisée, cette sous-section décrit la préparation des couches permettant de simuler l'activité en profondeur. Pour obtenir une description complète du sous-sol, trois étapes ont été nécessaires : le calcul de la profondeur de la nappe, la description des matériaux présents et le calcul de l'épaisseur de ceux-ci.

Profondeur de l'aquifère

La profondeur de l'aquifère a été calculée en soustrayant la hauteur piézométrique (Figure 1.8) à l'altitude du terrain (Figure 1.3). Le résultat est présenté ci-dessous.

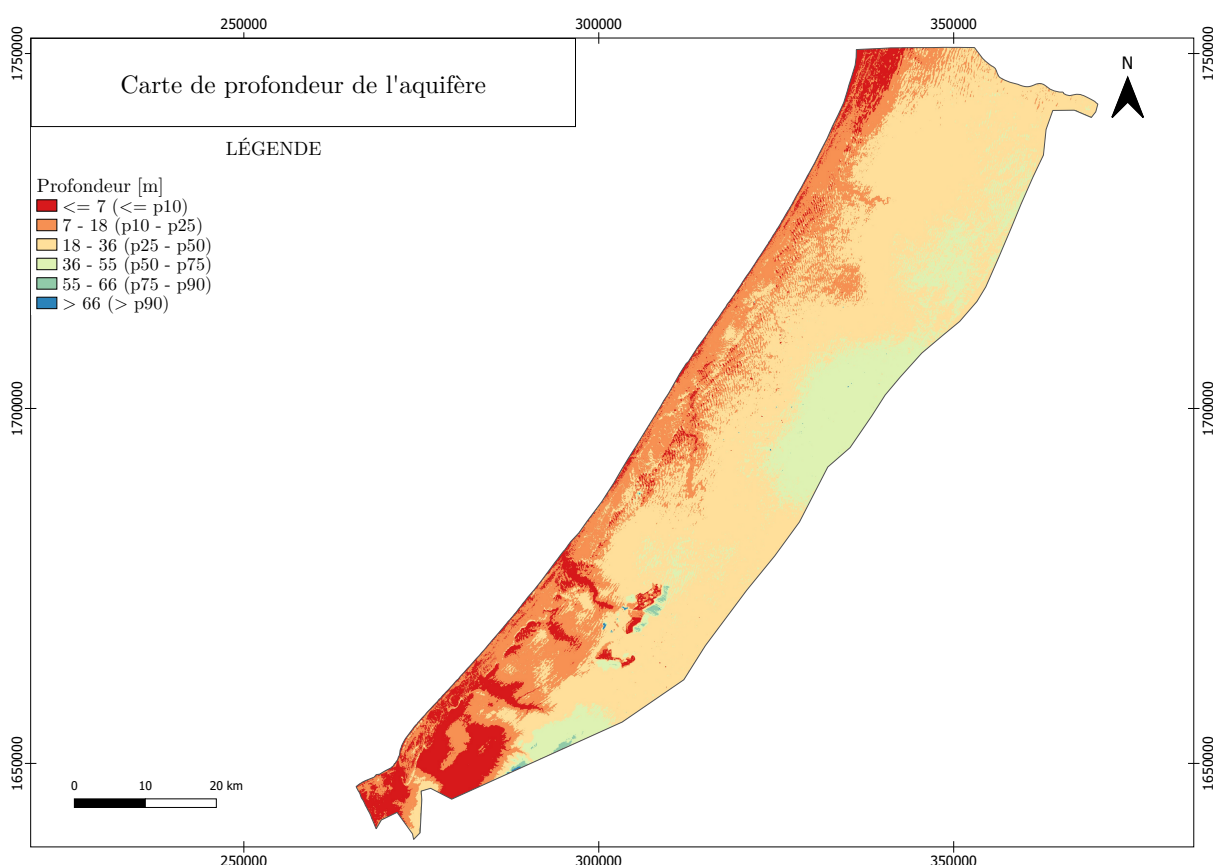


FIGURE 2.12 – Comparaison entre la hauteur piézométrique et la profondeur de la nappe

Une fois de plus, une classification statistique de quantiles a été choisie pour la carte de profondeur de l'aquifère, mais une classification discrète plutôt que linéaire semblait plus adaptée pour marquer les différents comportements de manière claire. Ainsi, 50% des valeurs ne dépassent pas les 36 mètres de profondeur. Au nord-est du Horst de Diass, le modèle a détecté une profondeur maximale de 73 mètres.

L'effet des vallées et des dunes se devine là où l'aquifère semble diminuer en profondeur. Ces dépressions risquent de jouer un rôle important dans les résultats, l'eau s'écoulant de manière préférentielle où la nappe affleure.

Description des matériaux

La profondeur de la nappe calculée, il est nécessaire de connaître l'épaisseur des couches géologiques pour déterminer les aquifères concernés par le modèle. La section précédente a déterminé que la profondeur de la nappe ne dépassait que rarement les 30 mètres de profondeur. Roger et al. (2009) affirmait que les sables du Mio-Plio-Quaternaire recouvrant la quasi totalité de la zone d'étude pouvaient dépasser les 100 mètres d'épaisseur. Ceux-ci sont de plus en concordance hydraulique avec l'aquifère des calcaires Lutétien sous-jacents. Deux couches sont alors modélisées dans ce travail : le sol et les couches du Mio-Plio-Quaternaire. Cette décision s'appuie de plus sur la carte en isopaques du Mio-Plio-Quaternaire réalisée par Roger et al. (2009) sur la base de 346 forages (cfr. Annexes).

Alors que la couche des sols reste inchangée (Figure 2.8), la carte géologique doit être simplifiée (Figure 2.13). Ainsi, seules les couches géologiques supérieures sont conservées. Il reste majoritairement les sables rouges et le cordon littoral des sables blancs et jaunes. À l'extrême sud, les argiles et calcaires karstifiés affleurent sous la couche de sol à la suite de l'activité tectonique du Horst de Diass. Finalement, les anciens fonds de vallées présentent des couches de sable avec une granulométrie moins bien classée (Barusseau et al., 2009 ; Roger et al., 2009).

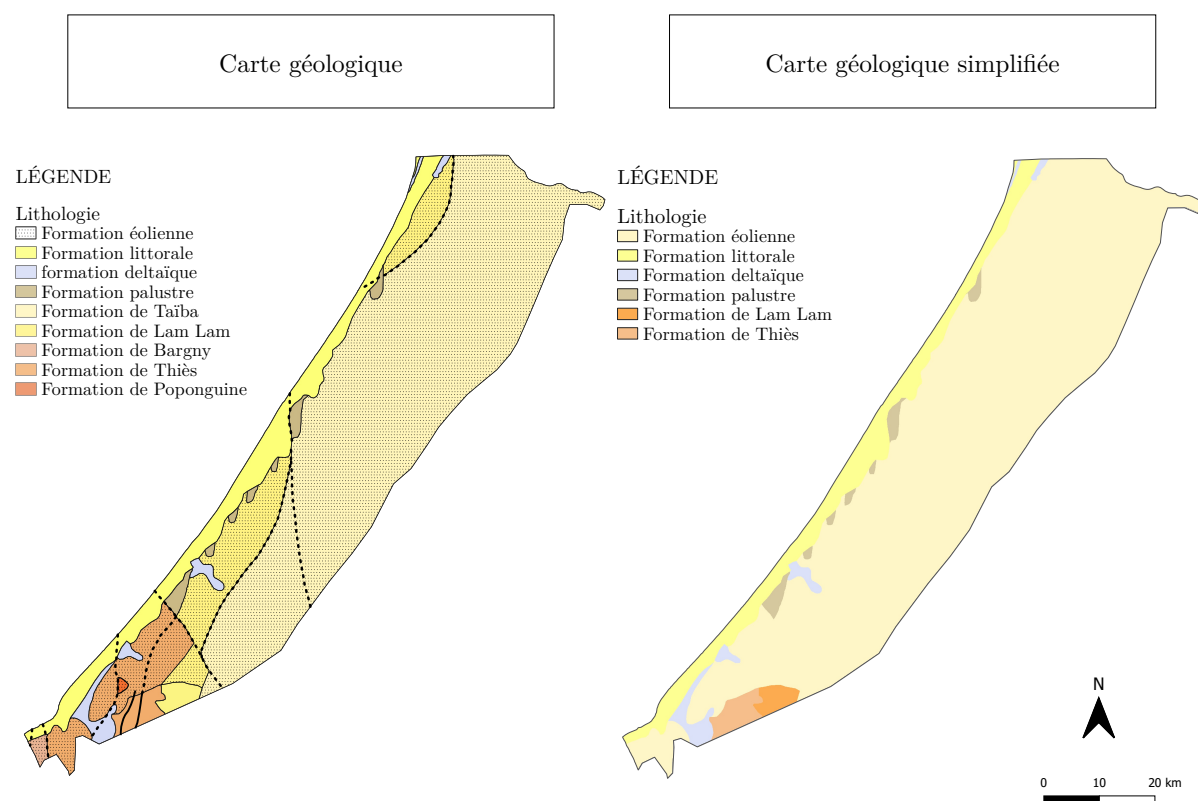


FIGURE 2.13 – Carte géologique d'après Noël et al. (2009) et carte géologique simplifiée

Les différents matériaux sont résumés Tableau 2.4. Les caractéristiques hydrodynamiques et hydrodispersives y sont également disponibles. K est la conductivité hydraulique à saturation et Pe le nombre adimensionnel de Peclet. Ce dernier compare sur une distance caractéristique de transport L l'importance relative des processus d'advection v_e et de dispersion D avec

$$Pe = \frac{L}{\alpha_L} \quad (2.10)$$

Pour les sols, ces valeurs sont principalement basées sur les valeurs déterminées par Thomas et al. (2004) dans le cadre de l'utilisation de la méthode *APSÛ* en Wallonie. Pour la géologie, les valeurs de conductivité hydraulique suivent Sall & Vanclooster (2009) et Roger et al. (2009). Les valeurs de Peclet ont été choisies pour correspondre aux matériaux d'aquifères wallons décrits par Brouyère et al. (2004c) en raison de l'absence de bibliographie présente sur ce sujet dans les Niayes.

Numéro	Composition	K [m/s]	n_e [-]	Pe [-]
1	Sable littoral	5.10^{-5}	0,2	10
2	Sable éolien latérisé	3.10^{-4}	0,15	10
3	Alluvion vases et sables (deltaïque)	2.10^{-5}	0,42	20
4	Sable humifère tourbeux (palustre)	5.10^{-5}	0,4	15
5	Calcaire karstifié (Lam Lam)	$1,5.10^{-4}$	0,02	5
6	Argile et marne blanche (Thiès)	5.10^{-8}	0,5	20
7	Argile lourde	1.10^{-8}	0,5	20
8	Limon argileux	1.10^{-7}	0,43	15
9	Argile sableuse	5.10^{-7}	0,5	20
10	Sable limono-argileux	1.10^{-6}	0,35	20

TABLE 2.4 – Valeurs des paramètres hydrodynamiques des différents matériaux

Épaisseur des couches

Les couches de matériaux à présent décrites, le calcul de l'épaisseur peut être envisagé. Celui-ci se base sur trois cas de figure en fonction de la profondeur de l'aquifère (Figure 2.14) :

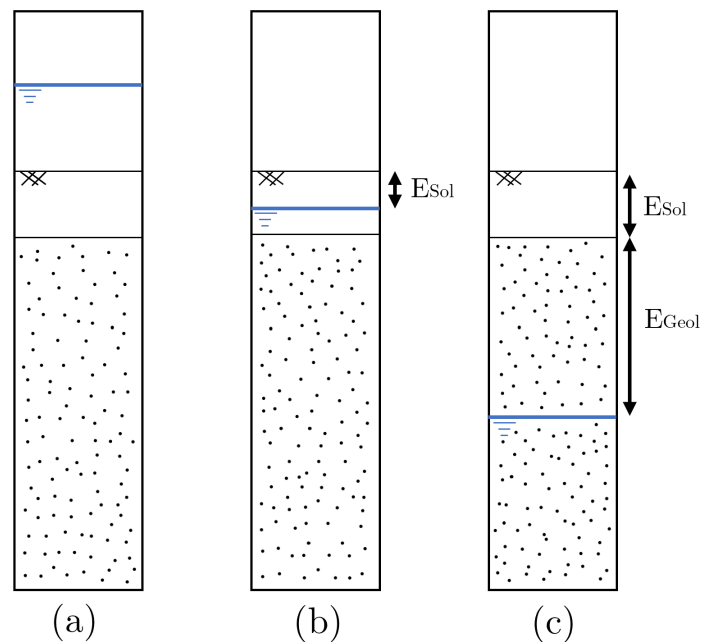


FIGURE 2.14 – Cas de figures envisagés pour le calcul d'épaisseur de couches

– L’aquifère affleure à la surface (a). Dans ce cas, les épaisseurs de sol E_{sol} et de sous-sol E_{Geol} à traverser pour atteindre la nappe sont nulles. En vue de modéliser un cas plus contraignant, un gradient hydraulique est imposé plutôt que de considérer la recharge pluviométrique. En effet, en utilisant un onzième matériau fictif, il est possible de représenter ces points où l’eau est poussée dans l’aquifère par une pression amenée par la colonne d’eau libre. En raison de la faible quantité d’eau généralement affleurant en surface, un gradient modérément élevé de 0,01 est choisi pour ces mailles.

– L’aquifère est compris dans la couche supérieure (b). L’épaisseur E_{sol} est alors calculée en soustrayant la profondeur de la nappe de l’altitude obtenue par le modèle numérique de terrain.

– L’aquifère est compris dans la couche inférieure (c). Pour la grande majorité des mailles, l’aquifère repose dans les sables du Quaternaire. L’épaisseur des sols correspond alors à l’épaisseur maximale décrite par la HWSD. Les sables limono-argileux font un mètre d’épaisseur tandis que les autres sols, plus fins, font dix centimètres. L’épaisseur E_{Geol} est ensuite calculée en enlevant la profondeur de la nappe à la hauteur de la base de sol.

Les résultats sont présentés Figure 2.15. Une approche statistique a une fois de plus été choisie pour représenter les classes de profondeur pour la carte de droite. Cela permet de comparer les résultats et la carte 2.12. Comme cité précédemment, la majorité de l’aquifère se situe dans les couches géologiques à des profondeurs ne dépassant pas 33 mètres. Les dunes et anciennes vallées sont toujours devinées par une diminution importante de l’épaisseur inférieure.

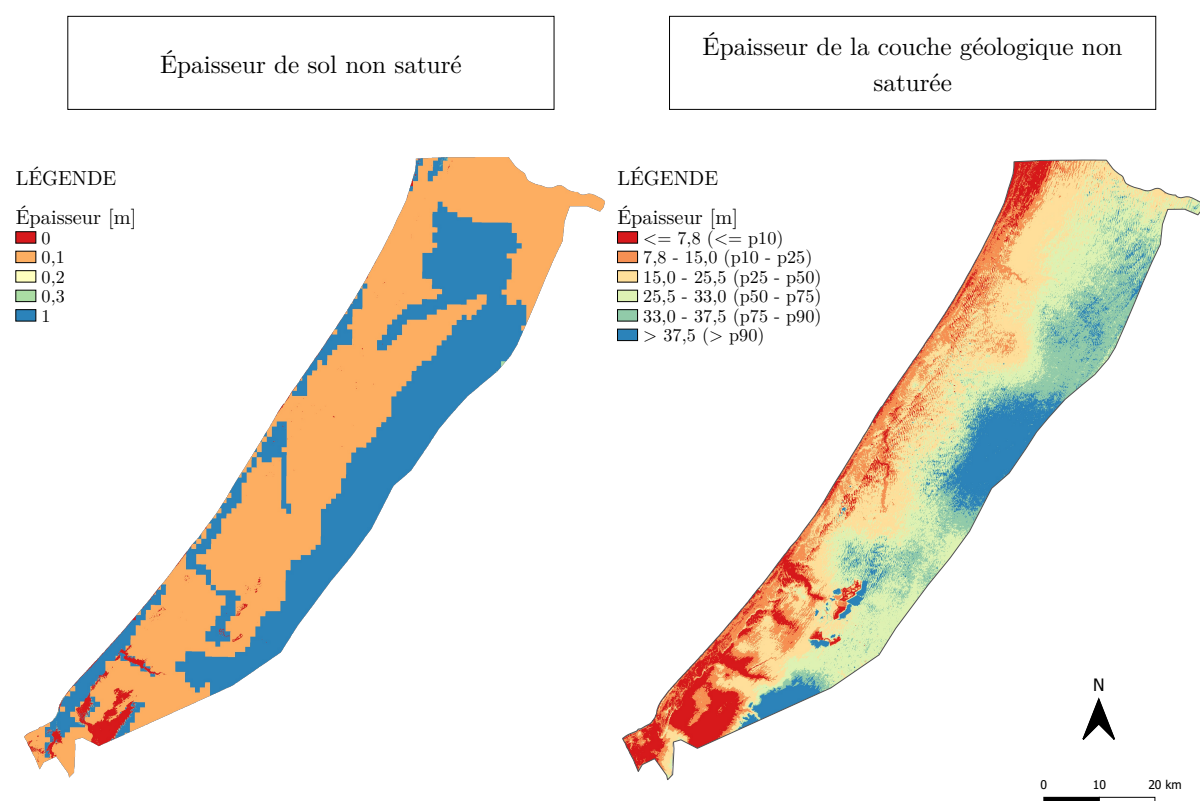


FIGURE 2.15 – Cartes des épaisseurs de couches supérieures et inférieures non saturées

2.3.7 Zones d'infiltration directe maximale

Le code implémenté permet de prendre en compte les mailles où l'eau va directement s'infiltrer sans ruisseler. La dangerosité directe de ces mailles y est alors maximale. Ce procédé permet de grandement diminuer le temps de calcul car l'écoulement ne doit pas être considéré. Deux types de cellules possèdent une dangerosité directe maximale (et donc une dangerosité latérale nulle) :

- les minima locaux, calculés avec la fonction "local minima and maxima" de QGis ;
- les cellules où la nappe est affleurante, obtenues et discutées dans la section précédente.

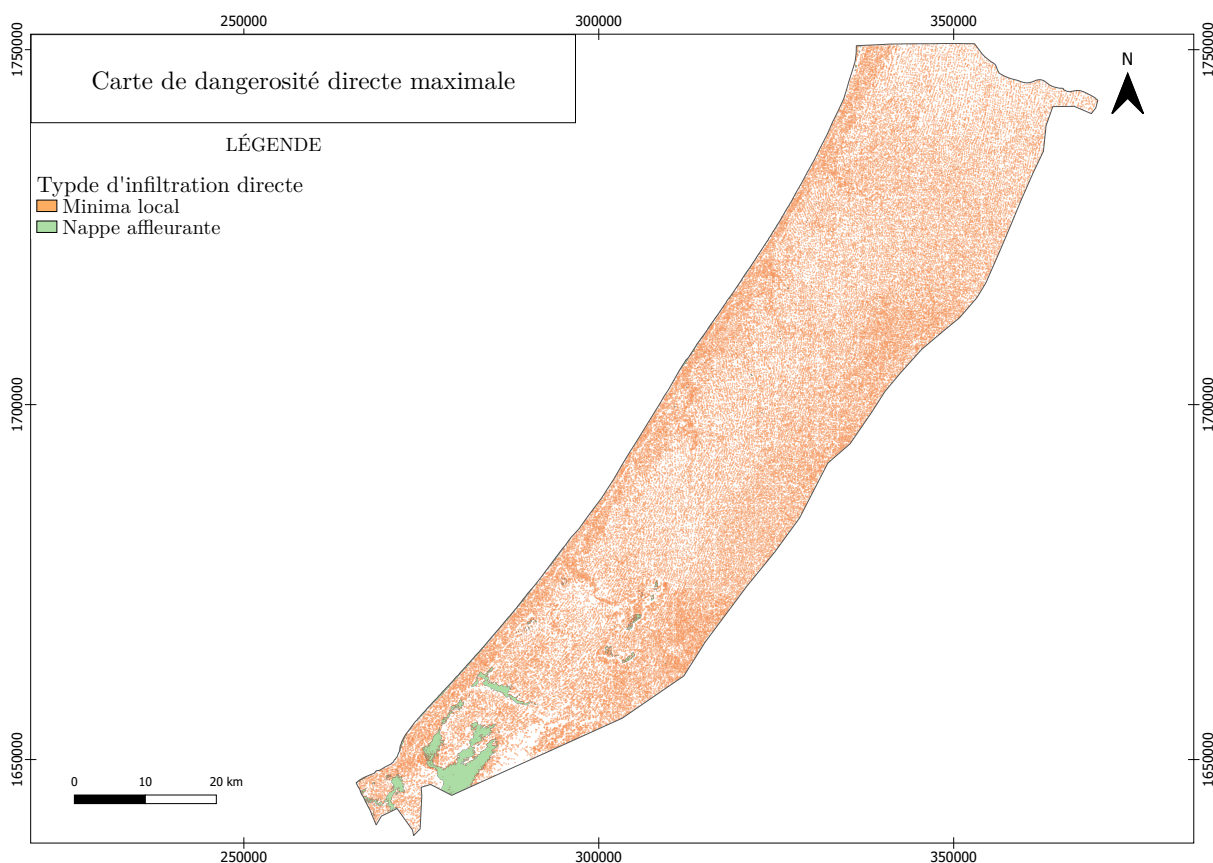


FIGURE 2.16 – Carte de dangerosité directe maximale

La carte 2.16 présente la dispersion de ces zones d'infiltration directe maximale. Le paysage de dunes permet de soulager le code grâce aux 137 202 cellules (parmi les 3,5 millions) pour lesquelles l'écoulement ne doit pas être calculé.

De plus, ce procédé permet de tenir compte des dépressions plus petites que la taille des cellules, qui auraient été lissées par le modèle, en forçant celui-ci (Figure 2.17). Puisque les minima ont été calculés à partir du MNT, qui possède la même résolution de 30 mètres, ce cas n'est pas d'application.

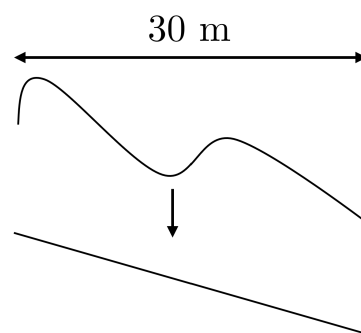


FIGURE 2.17 – Exemple de lissage par le modèle

2.4 Application à la zone des Niayes : Résultats

Cette section présente les résultats de la modélisation avant de les discuter via une analyse de sensibilité et d'avancer des pistes d'amélioration du modèle.

2.4.1 Évaluation des coefficients de dangerosité de la surface du terrain

APSÛ calcule d'abord les coefficients de ruissellement et d'infiltration pour toute la zone. Ensuite, elle y associe les minima locaux identifiés pour obtenir les coefficients de dangerosité directe. La carte de dangerosité directe 2.18 est donc la combinaison des cartes 2.9 et 2.16. La légende a une fois de plus été choisie pour représenter les percentiles. Cette section utilise cependant une classification discrète plutôt que linéaire afin de délimiter clairement les différents comportements plutôt que le spectre de valeurs obtenues. Un zoom appliqué à une région à la fois composée de dunes mais aussi de cultures intensives permet de représenter les variations locales lissées par l'échelle. Obtenir une information plus détaillée de cette zone sensible semble être un atout dans le cadre de cette étude.

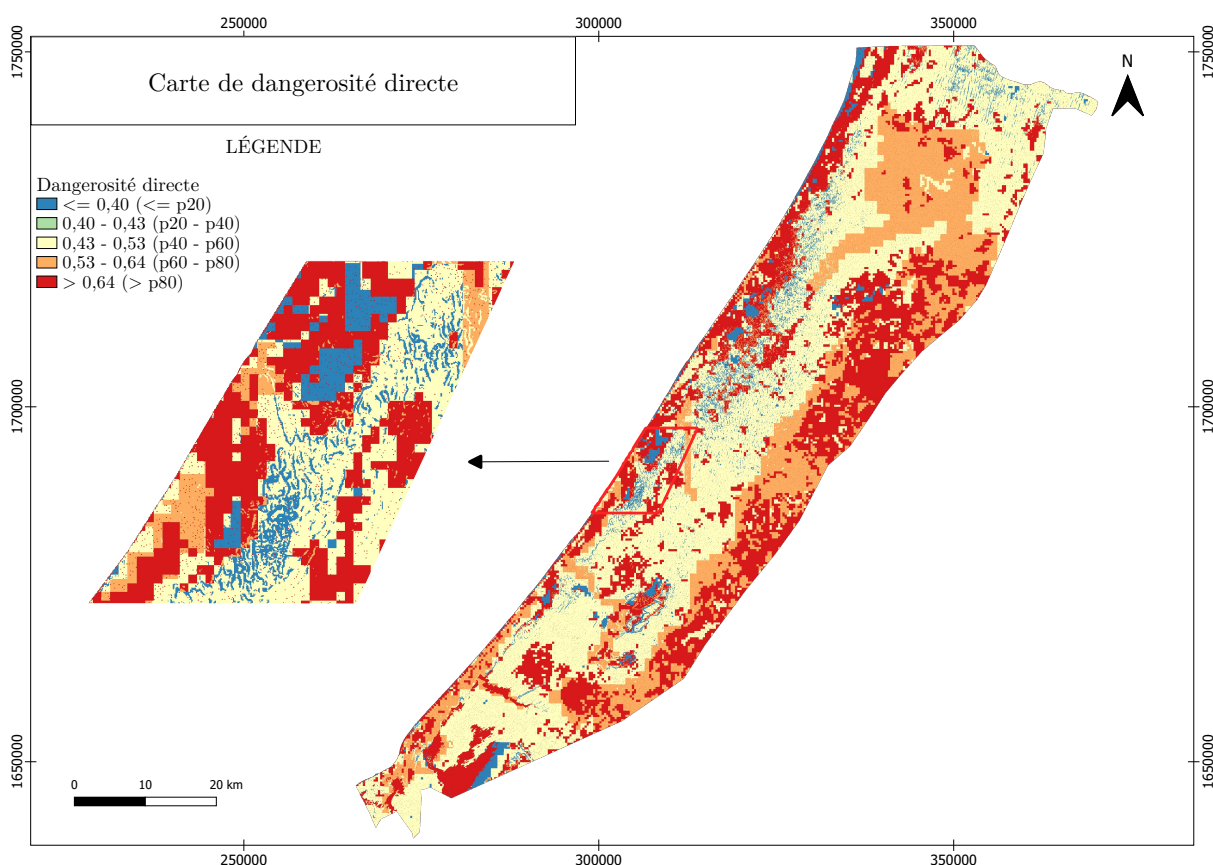


FIGURE 2.18 – Carte de dangerosité directe

Comme attendu, une dangerosité maximale est observée où la nappe est affleurante. De plus, la zonation discutée au chapitre précédent est visible : la zone centrale peu infiltrante couverte de cultures reposant sur un sol fin et les zones de pâturage sur des sols plus grossiers.

L'autre carte de dangerosité générée est la carte 2.19 de dangerosité latérale cumulée. Cette carte, qui prend en compte les directions d'écoulement, semble présenter 20% de valeurs nulles. Le zoom permet d'observer les résultats tigrés causés par le paysage dunaire. En effet, au sommet de ces dunes, la dangerosité latérale cumulée est nulle car aucune eau provenant d'une autre cellule ne s'y infiltre.

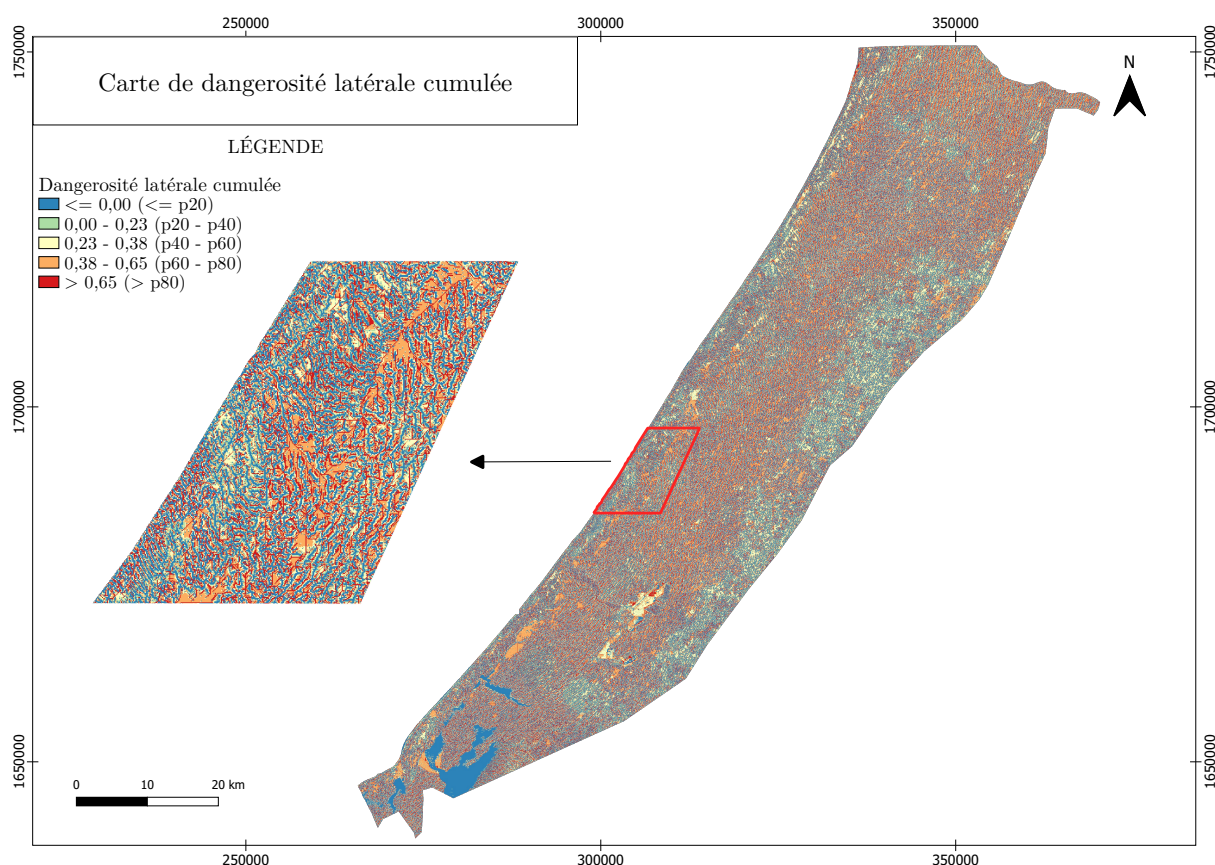


FIGURE 2.19 – Carte de dangerosité latérale cumulée

2.4.2 Évaluation de la capacité d'atténuation du milieu souterrain

La méthode *APSÛ* cherche à connaître le temps nécessaire pour que le polluant conservatif atteigne l'aquifère, dans quelle ampleur et pendant combien de temps. Pour ce faire, deux cas sont simulés :

- un écoulement gravitaire pour la majorité des cellules ;
- un écoulement forcé en imposant un gradient hydraulique pour les cellules plus sensibles.

Le premier, utilise la valeur d'infiltration efficace pour calculer le flux tandis que le second le calcule à l'aide de la formule de Darcy, du gradient imposé et de la perméabilité du matériau. Ensuite, la vitesse effective est obtenue en divisant le flux par la porosité effective. Finalement, les variables t_0 , C_{max} et d sont obtenues en calculant le transfert simplement advectif, puis en y considérant le phénomène de diffusion sur la base du nombre de Peclet du ou des matériau(x).

Un lien clair entre les trois variables peut être identifié sur la Figure 2.20³. L'impulsion de Dirac (i) simulant l'entrée du contaminant dans le sous-sol, d'une intensité infiniment grande sur un laps de temps infiniment court, parcourt les matériaux en s'infiltrant en profondeur. Les deux matériaux (a et b) possèdent des caractéristiques différentes. Le premier, plus sensible à une contamination, présente une porosité effective plus faible et un nombre de Peclet plus grand. Le pic de contaminant arrive plus tôt dans celui-ci à cause de sa porosité effective plus faible, et il semble s'être moins dilué à cause d'un nombre de Peclet plus élevé.

3. Il est à noter qu'une exagération a été réalisée pour mieux représenter les différents comportements. Le contaminant étant conservatif, les intégrales des trois courbes sont identiques.

Un contaminant qui se propage plus rapidement va présenter un temps t_0 d'arrivée et une durée de pollution plus faibles mais une concentration maximale plus élevée.

Les trois résultats représentant le même comportement, seuls ceux liés aux de temps de transfert sont alors commentés dans cette section, ceux-ci étant les plus importants dans le cadre d'une prise de décision liée à la protection. Les autres résultats sont néanmoins disponibles en annexe.

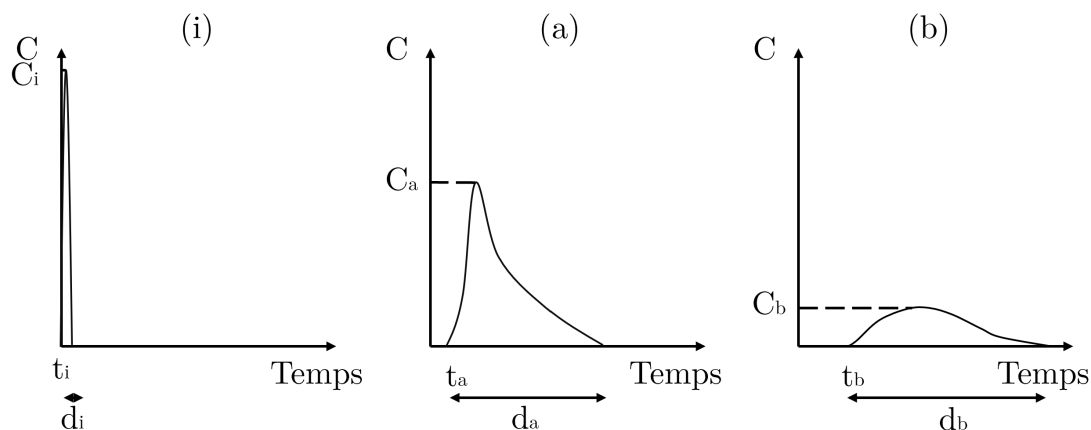


FIGURE 2.20 – Évolution de la concentration en fonction du temps pour différents cas de figure : (i) valeurs données en entrée, (a) et (b) valeurs obtenues en sortie pour des matériaux différents

La carte 2.21 présente les temps de transfert minimaux calculés par *APSÛ*. La légende à été choisie pour représenter les percentiles 10, 25, 50, 75 et 90 afin d'obtenir une information détaillée du panel de valeurs.

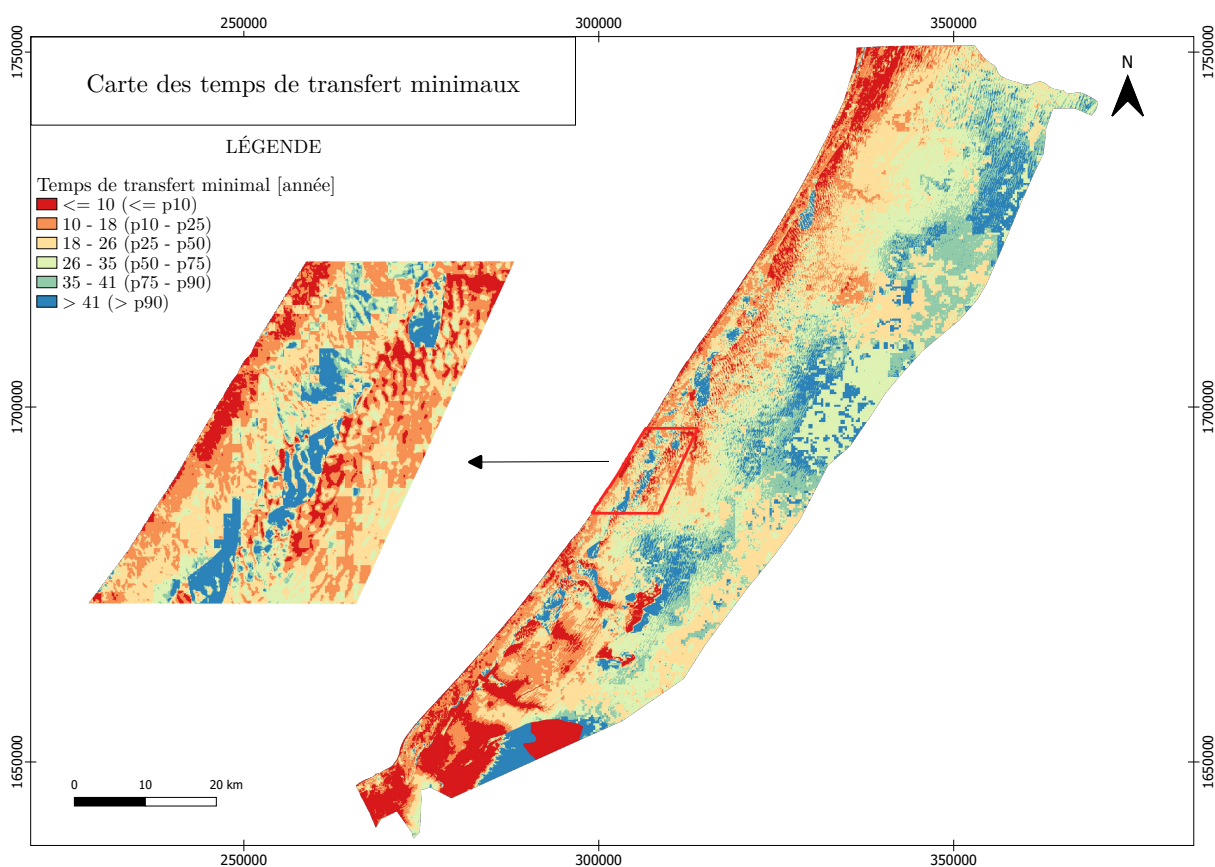


FIGURE 2.21 – Carte des temps de transfert minimaux

De manière générale, l'infiltration se fait à une vitesse moyenne d'un mètre par an. Les résultats semblent prendre en compte aussi bien les effets de surface, en montrant des temps de transferts différents en fonction de la couverture, que les effets de profondeur.

Il semble que la faible porosité efficace des calcaires karstifiés entraîne des temps de transfert très courts pour la formation de Lam Lam malgré une profondeur de nappe importante. À l'est, les argiles blanches de Thiès peu perméables renvoient des temps de transfert très longs.

Les dunes ressortent une fois de plus en présentant des temps de transfert contrastés. La nappe presque affleurante au sud-ouest et les anciennes vallées montrent des parcours plus courts.

La carte 2.21 tient compte des coefficients de ruissellement pour obtenir l'infiltration efficace mais ignore les directions d'écoulement de surface tandis que la carte 2.22 présente les temps de transfert équivalents, calculés par pondération des temps de transfert de l'entourage avec les dangers correspondantes (cfr. équation 2.4).

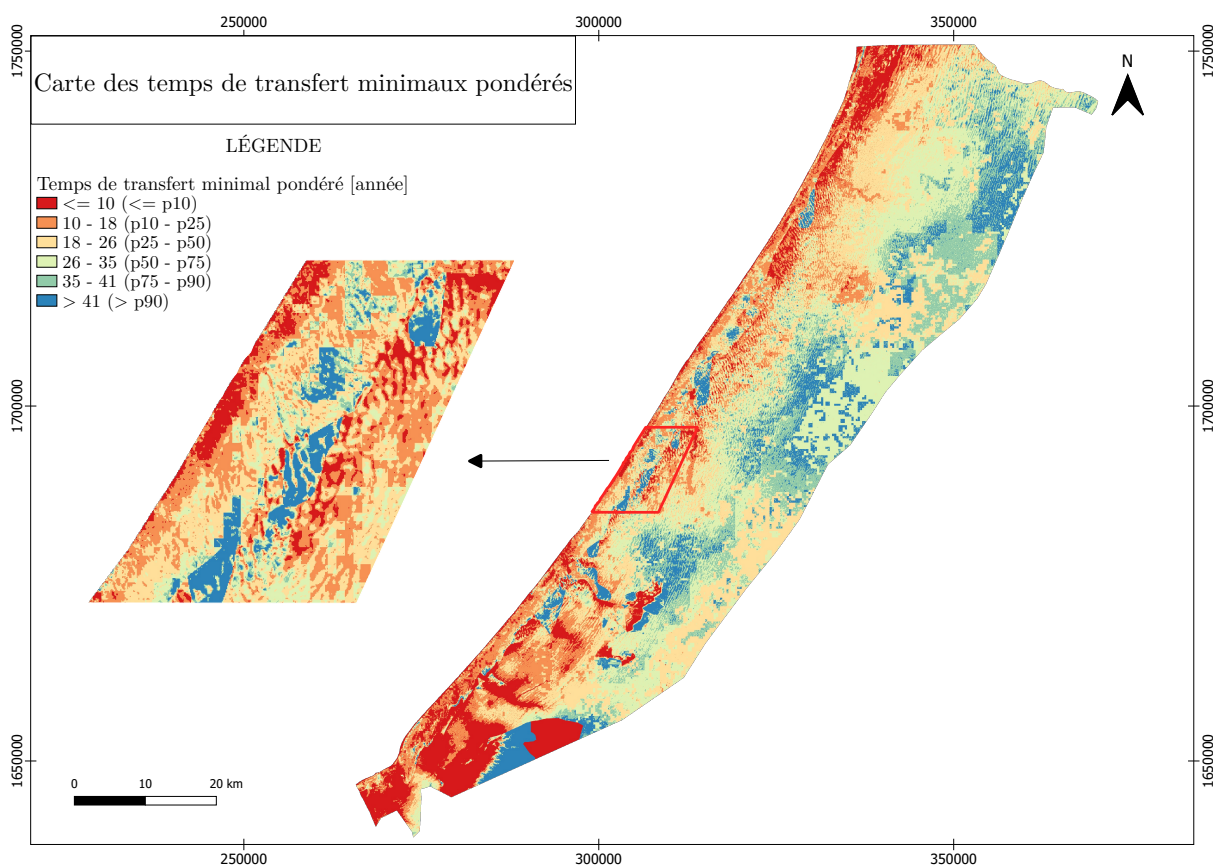


FIGURE 2.22 – Carte des temps de transfert minimaux pondérés

Peu de changements sont observables entre les deux cartes. En effet, le paysage dunaire entraîne des parcours en surface généralement limités. L'eau ne parcourant que des faibles distances, les temps pondérés ne peuvent être influencés que par des cellules voisines, avec des différences modérées.

Le zoom de la Figure 2.23 semble toutefois montrer que la carte de temps de transfert pondérés propose des vulnérabilités plus élevées. En effet, en tenant compte du ruissellement, les cellules en haut des dunes peuvent diminuer leurs résultats suite à l'écoulement rapide jusqu'au pied de celles-ci (réduisant ainsi la profondeur de la nappe).

Pour garder un cas d'étude plus réaliste et plus contraignant, la suite de l'étude est réalisée sur la base des temps de transfert pondérés.

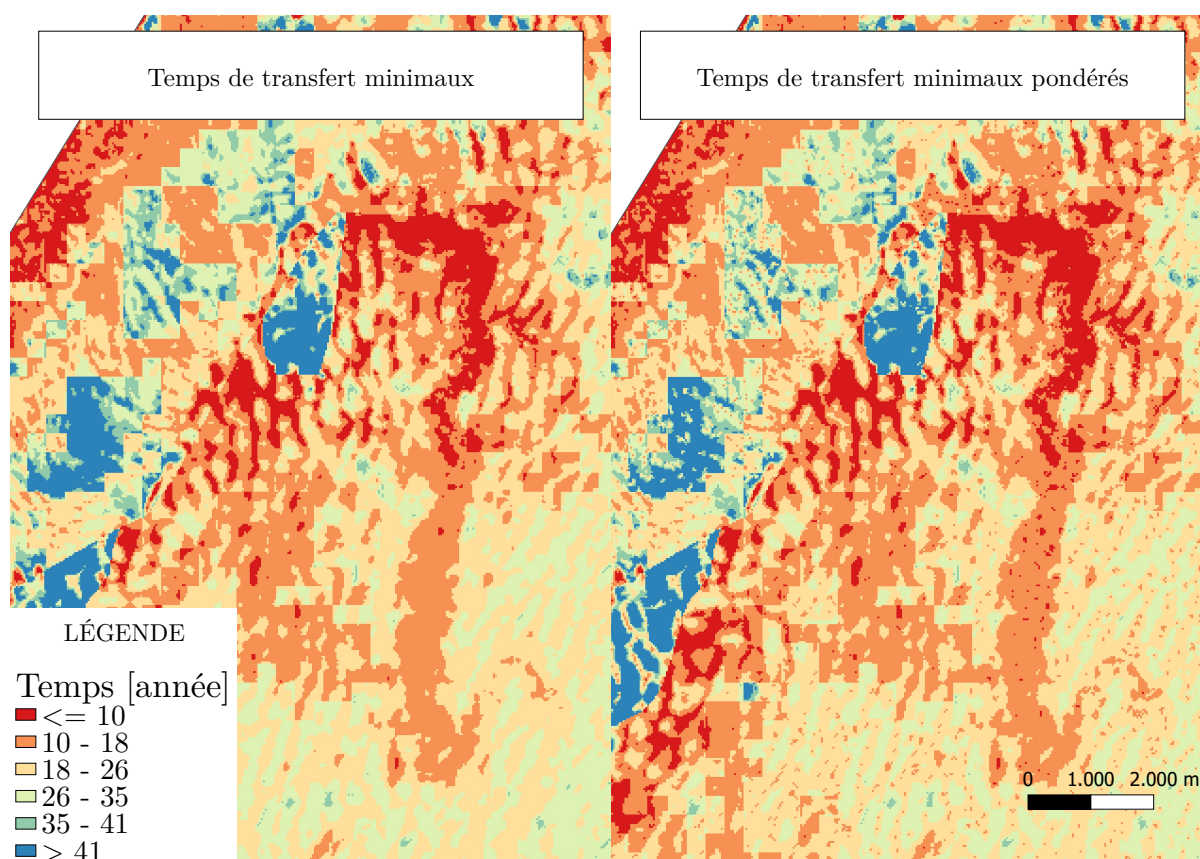


FIGURE 2.23 – Comparaison entre les temps minimaux et les temps minimaux tempérés

2.4.3 Carte de vulnérabilité des Niayes

Comme discuté en début de chapitre, une classification de la vulnérabilité peut être réalisée. La classification mise en place par *APSÛ* et son application sont disponibles Tableau 2.5 et carte 2.24.

Vulnérabilité	6	5	4	3	2	1
Temps de transfert pondéré	<1 heure	<1 jour	<50 jours	<1 an	<10 ans	>10 ans

TABLE 2.5 – Classification de la vulnérabilité implémentée dans *APSÛ*

La classification de base est en lien avec la gestion des zones de protection de captages en Wallonie. Celle-ci est adaptée pour une étude à l'échelle d'un bassin belge.

Peu de contrastes sont visibles avec cette classification. Trois classes de vulnérabilité, relatives à trois mécaniques, sont cependant observables sur la carte :

- les zones de nappe affleurante (classe 6), au sud ;
- les zones de nappe à faible profondeur (classe 2), dans les anciennes vallées et dépressions dunaires le long du littoral ;
- les zones de nappe à plus de 10 mètres de profondeur (classe 1), couvrant la majorité de la carte.

La zone d'étude étant très étendue et aucune rivière majeure n'étant présente dans la zone, une profondeur d'une dizaine de mètres est très rapidement rencontrée, peu de nuances existent alors entre 1 jour et 10 ans.

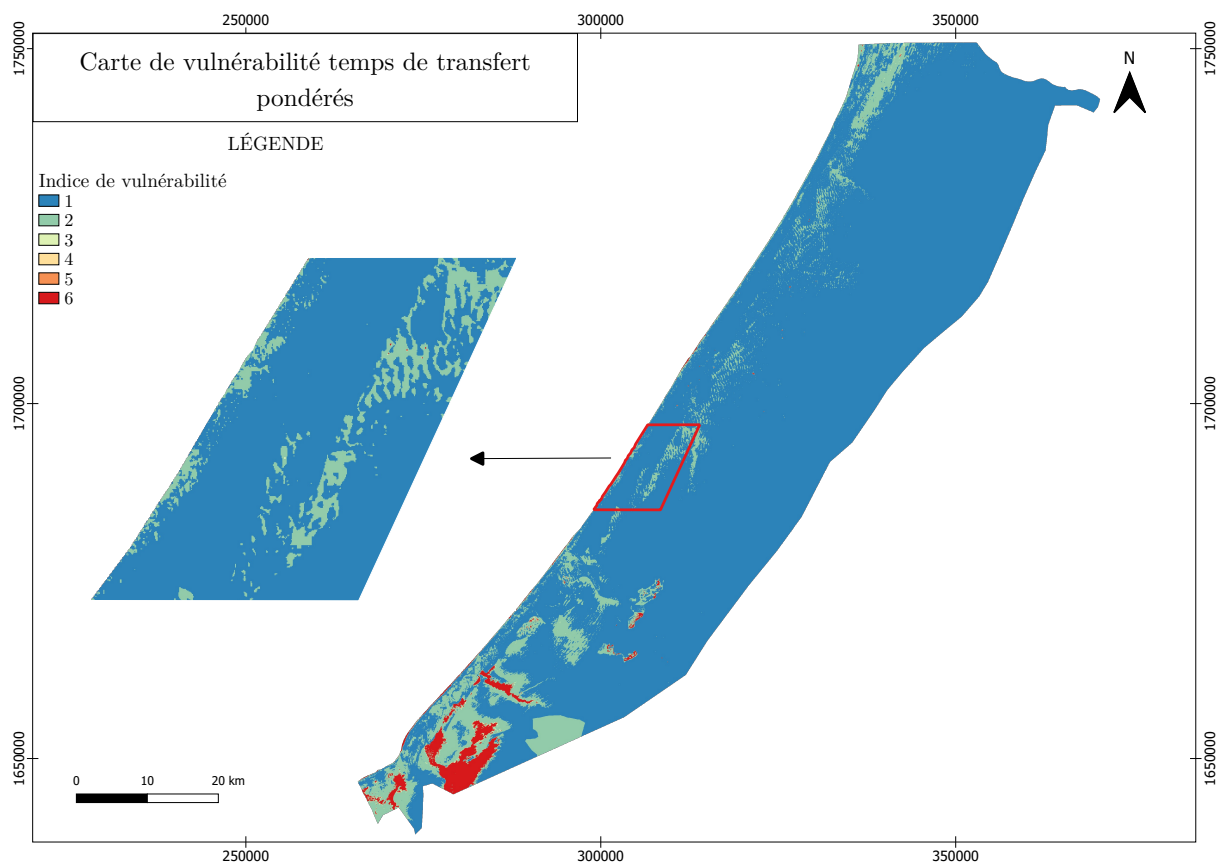


FIGURE 2.24 – Carte de vulnérabilité temps de transfert pondérés

Afin d'apporter plus de nuances dans les résultats, une nouvelle classification a été déterminée sur la base de l'histogramme des temps de transfert pondérés (Figure 2.25). Celui-ci est en accord avec les valeurs de classes de la carte 2.22.

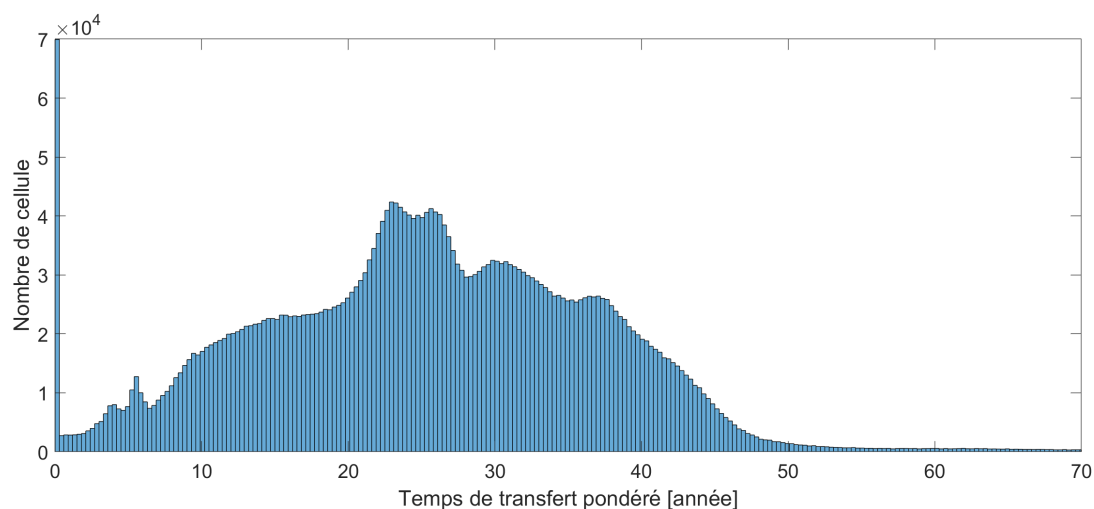


FIGURE 2.25 – Histogramme des temps minimaux de transfert pondérés

Parmi les 3 516 768 cellules actives, 1,98% présentent des temps de transfert inférieurs à un jour. Aussi, 4,16% d'entre elles ont des trajectoires d'une durée inférieure à 5 ans. Ajouter des classifications entre ces périodes de temps n'apporterait que peu d'information.

Ainsi, la classification a été choisie pour présenter une différence générale de 5 ans par catégorie. De plus, une septième classe a été ajoutée afin de faire la différence entre des temps de transfert inférieurs à une journée et ceux inférieurs à 5 ans afin de mettre en évidence les zones de nappe affleurante, critiques pour la qualité de l'aquifère. Le Tableau 2.6 reprend les percentiles relatifs à chaque catégorie de la nouvelle classification.

Temps de transfert pondéré	<1 jour	<5 ans	<10 ans	<15 ans	<20 ans	<30 ans
Percentile [%]	1,98	4,16	9,7	19,32	30,56	65,22

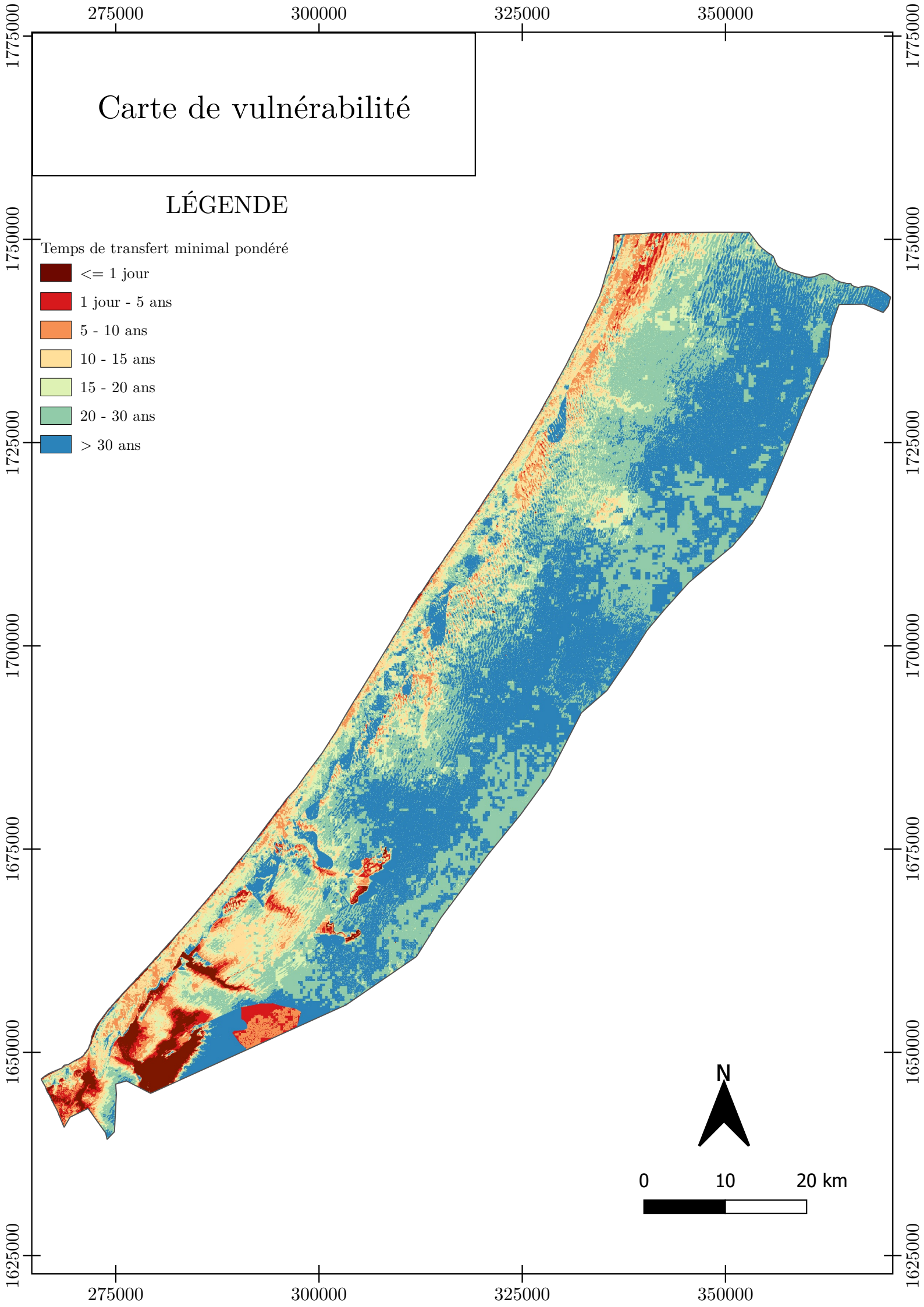
TABLE 2.6 – Percentiles relatifs à la nouvelle classification

La carte de vulnérabilité affinée est proposée au format A4 ci-dessous. Les zones plus vulnérables semblent se situer dans les dépressions dunaires des sable rouge le long du littoral, dans la partie excavée de la mine de phosphates de Darou Khoudoss, dans la formation calcaire de Lam Lam, mais surtout dans les zones de nappe affleurante.

Les temps de transfert étant généralement très longs lorsque la nappe se situe dans le sous-sol, changer la classification pour présenter plus de couleurs peut avoir des effets négatifs si les nouveaux résultats ne sont pas pris en compte avec leur légende. En effet, la mise en place d'un cadre de protection de l'aquifère sera abordé presque de la même manière par un hydrogéologue si les temps de transferts obtenus sont de 25 ou 30 ans. En revanche, présenter une carte avec une vulnérabilité plus élevée pour une des deux catégories peut amener à une prise de décision différente. Le choix de classe peut changer la manière d'interpréter les résultats si ils ne sont pas analysés avec une légende claire.

Finalement, il semble que les paramètres de profondeur d nappe aient le plus d'influence sur les résultats. La recharge étant très faible, des temps de transfert minimaux de plusieurs années sont attendus. Le modèle semble alors présenter l'aquifère supérieur des Niayes comme capable d'atténuer de manière importante une contamination potentielle i.e. porteur d'une faible vulnérabilité.

Il est cependant important de noter qu'il s'agit d'un modèle et non de la réalité. Pour une meilleure compréhension des phénomènes hydrogéologiques de la zone, les sections suivantes proposent une analyse de sensibilité du modèle ainsi que des pistes pour améliorer celui-ci.



2.5 Analyse de sensibilité

Les résultats obtenus reposent sur des hypothèses de modélisation importantes. Dans l'incapacité d'améliorer la qualité des données de base, une analyse de sensibilité apporte un avantage apparent. Celle-ci étudie l'évolution du modèle à la suite d'un changement de paramètres. En connaissant la manière dont les résultats varient, l'identification des zones plus sensibles malgré des données incertaines est plus précise. Ainsi, trois types de changements ont été opérés : sur la recharge, sur les paramètres hydrodynamiques et sur l'infiltration préférentielle.

2.5.1 Variation de la recharge

La modélisation de l'eau utile est basée sur plusieurs simplifications :

- Les données climatiques d'un village ont été utilisées pour l'ensemble du bassin.
- La méthode de calcul d'évapotranspiration potentielle choisie est celle mise en place par la FAO. Le modèle consiste en l'application de l'équation de Penman-Monteigh pour une surface herbacée (Allen et al., 1998).
- Une vidange exponentielle d'un stock possédant la même capacité sur l'ensemble de la zone d'étude a été considérée.

Toutes ces simplifications ont permis d'obtenir une information sur la vulnérabilité des Niayes. L'évolution des résultats suite à un changement d'eau utile est disponible Figure 2.26.

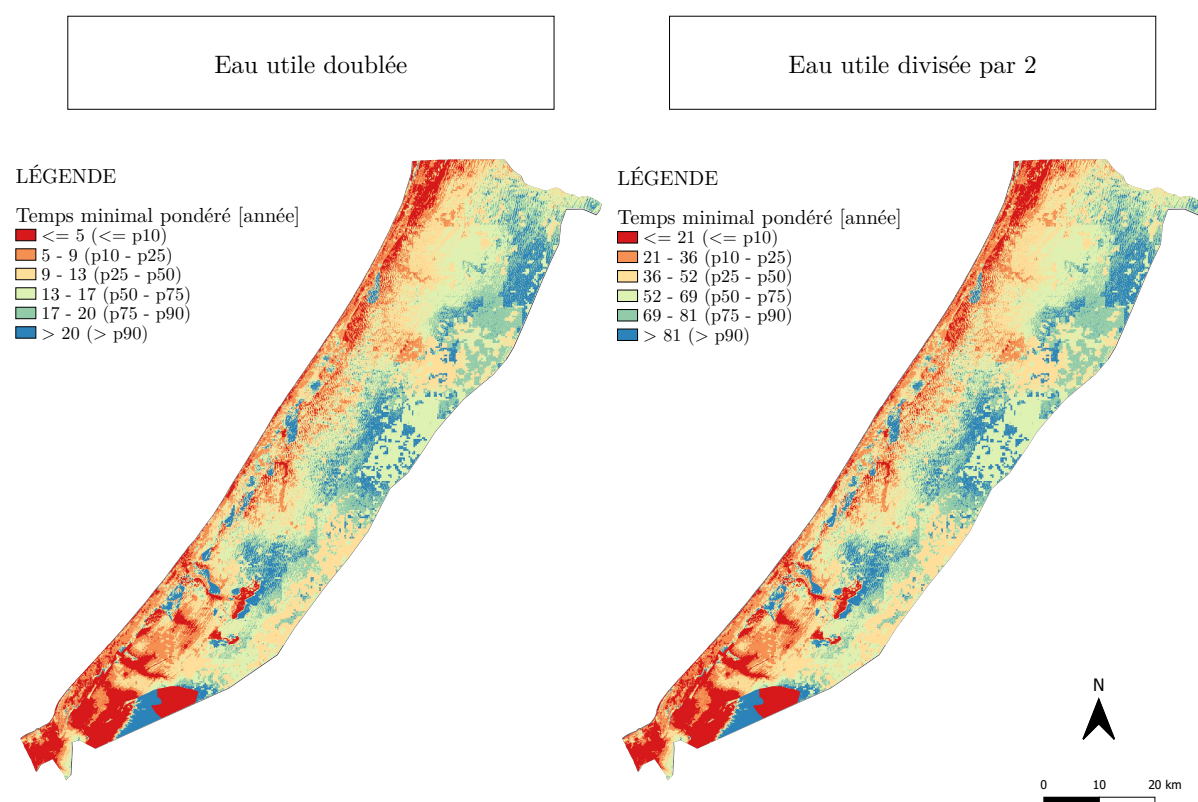


FIGURE 2.26 – Évolution des temps de parcours minimaux pondérés suite à un changement d'eau utile

Une fois de plus, une approche en percentiles a été préférée pour identifier les différents comportements du bassin. Les paramètres variant uniformément sur l'ensemble de la zone, il semble normal que les mêmes tendances soient observables que précédemment (cfr. Figure 2.22). En revanche, les valeurs sont différentes. Une recharge plus importante entraîne des vitesses d'écoulement plus importantes et donc un temps de transfert minimal plus court.

Il semble qu'un changement de recharge induise des temps de transferts fort différents. Il est donc nécessaire d'analyser les valeurs obtenues avec prudence. Cependant, les résultats à l'échelle du bassin identifient les mêmes zones comme étant plus sensibles. Une étude de vulnérabilité étant une première approche dans la caractérisation d'un plan de protection des ressources en eau, visant à identifier les zones à étudier plus en profondeur, cette constance paraît rassurante.

2.5.2 Variation des paramètres hydrodynamiques

Trois paramètres régissent l'écoulement souterrain du contaminant : le nombre de Peclet, la conductivité hydraulique (à saturation) et la perméabilité effective. Les nouveaux modèles présentés carte 2.27 traduisent un changement de perméabilité et de conductivité, ceux-ci étant responsables de l'écoulement advectif (le plus influent sur le temps de transfert total).

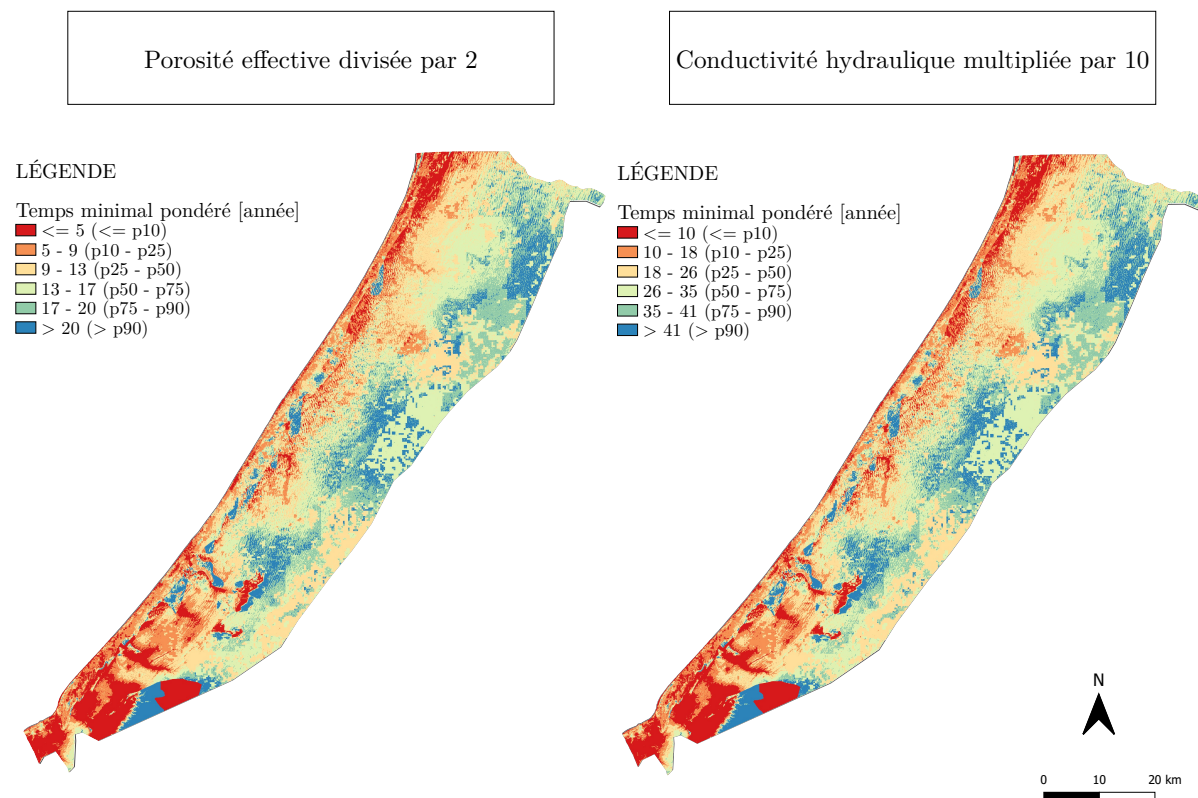


FIGURE 2.27 – Évolution des temps de parcours minimaux pondérés suite à un changement de paramètre hydrodynamique

Une fois de plus, les zones les plus sensibles identifiées sont identiques. Une porosité effective plus faible a le même effet qu'une augmentation d'eau utile, ces deux paramètres étant responsables de la valeur de v_e .

La perméabilité hydraulique semble moins influencer le modèle. L'écoulement souterrain étant généralement simulé selon une dynamique gravitaire, elle n'influence que les cellules avec un écoulement préférentiel dirigé par un gradient hydraulique imposé. Ces cellules représentant uniquement les zones de nappe affleurante, peu de changements sont alors attendus.

2.5.3 Variation de la dynamique d'écoulement

La dynamique responsable du transport de contaminant dans la zone vadose a été simplifiée dans la conception de ce modèle. Il est alors possible de se demander si un autre comportement pourrait être plus représentatif de l'activité hydrogéologique réelle des Niayes. En effet, les cultures irriguées par l'eau souterraine pourraient induire une recharge artificielle plus importante que celle calculée à partir de la pluviométrie. Des temps de transport plus faibles seraient ainsi observables dans ces zones plus susceptibles d'être contaminées, où la véracité des résultats est plus critique.

La Figure 2.28, simulant un écoulement préférentiel imposé sur l'entièreté du bassin, a été réalisée. La carte obtenue mise en comparaison avec le modèle d'origine pourrait amener à une meilleure interprétation des résultats globaux. Elle présente des temps de transfert grandement réduits, qui se comptent désormais en jours. Les zones affichant des parcours plus longs reposent sur des sols plus épais. En effet, la conductivité hydraulique des sols étant considérée comme plus importante que celle des sables, le temps de transfert total est influencé par l'épaisseur de ceux-ci dans le cadre du calcul d'un écoulement préférentiel.

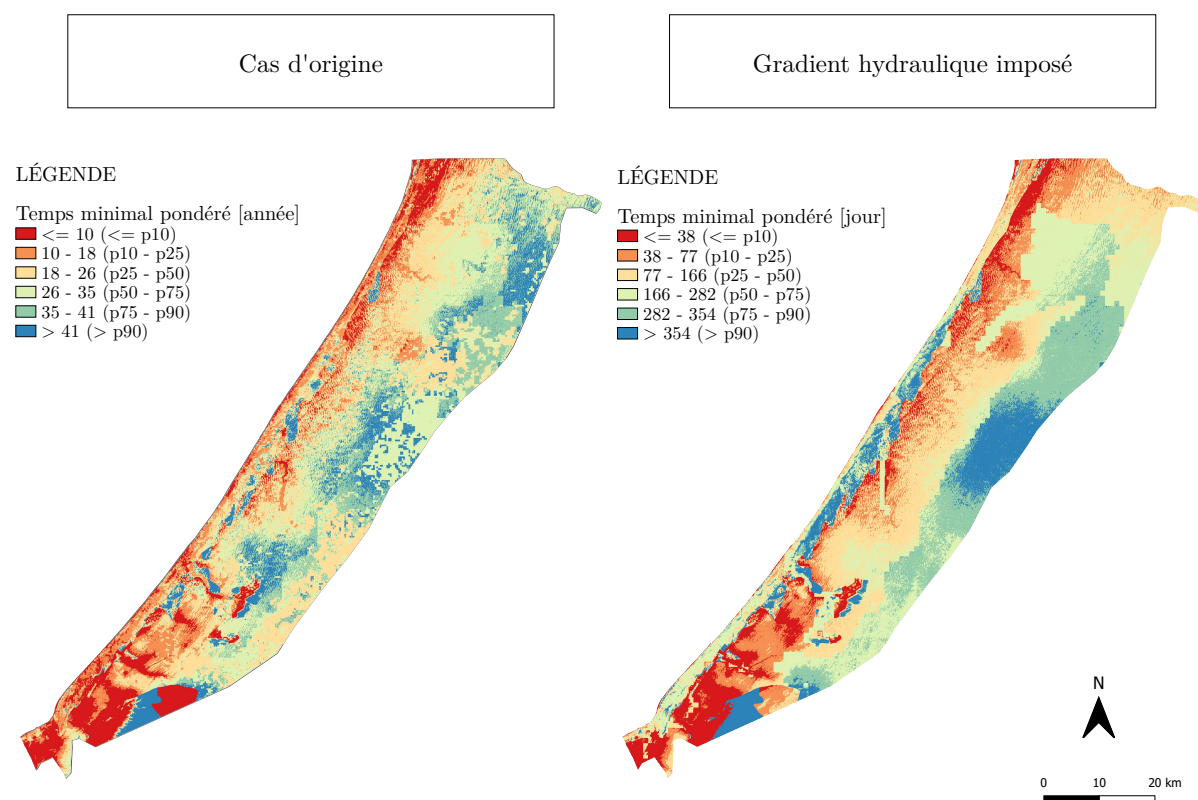


FIGURE 2.28 – Évolution des temps de parcours minimaux pondérés suite à un changement de dynamique d'écoulement

La rangée de dunes rouges derrière le cordon littoral semble à nouveau présenter les temps de transfert les plus faibles avec la zone dépressive entre Thiès et Kayar, la formation de Lam Lam et la mine de phosphates de Darou Khoudoss. Ces résultats semblent rassurant car, si le modèle présente les mêmes tendances malgré les changements décrits, les décisions relatives à la protection de la ressource en eau souterraine seront tournées vers les mêmes zones.

Des temps de transfert beaucoup plus faibles sont obtenus en considérant une infiltration préférentielle artificielle. L'aquifère, qui présentait jusqu'alors des vulnérabilités faibles, présenterait des vulnérabilités entre 1 et 3 sur l'échelle de classification belge avec le nouveau modèle, passant d'une moyenne de 26 ans à 6 mois.

La considération de l'existence, de l'intensité et de l'impact d'écoulements préférentiels dans la nappe devient ainsi primordiale dans l'étude de qualité du bassin. En effet, une étude sur la capacité des sables et, dans une moindre mesure, des sols à permettre un écoulement forcé par un apport en eau important doit être évalué.

Les résultats obtenus pourraient montrer qu'une contamination anthropique⁴ n'aurait un effet visible sur l'aquifère que si celle-ci est introduite de manière artificielle, la recharge entraînant des vitesses effectives trop faibles comparées à la profondeur de la nappe dans le cas contraire. Ces infiltrations préférentielles pourraient exister à deux endroits : au niveau des champs irrigués et au niveau des rejets d'eau usées en milieux urbains et industriels. Une importante campagne d'échantillonnage, combinée à une étude plus approfondie des caractéristiques hydrogéologiques des matériaux devrait être organisée pour confirmer cette hypothèse.

La section suivante présente d'autres pistes afin d'améliorer la qualité des résultats obtenus.

2.6 Discussion des résultats et propositions en vue d'amélioration

Les temps de transfert obtenus semblent varier énormément en fonction des paramètres d'entrée. Cette section propose des pistes afin d'améliorer la qualité de ceux-ci et ainsi amener à une meilleure compréhension de la mécanique de la zone.

Amélioration des données d'occupation des sols

La classification d'occupation du sol a dû être simplifiée de manière importante alors qu'une information supplémentaire existe. Des recherches liées à l'influence sur le ruissellement des autres classes plus complexes réalisées par l'ESA pourrait amener à des résultats plus représentatifs. De plus, le climat induit des changements importants en terme d'occupation du sol tout au long de l'année. En effet, lors de la mousson, de la nouvelle végétation pousse de manière naturelle et change ainsi la capacité du sol à faire ruisseler l'eau. Cependant, la recharge se fait uniquement autour de la saison des pluies, la condition de surface en dehors de celle-ci devrait alors être moins importante. La question de l'effet d'un coefficient de ruissellement évolutif peut se poser.

Amélioration des données pédologiques

Les données relatives au sol ont une double importance. Ils sont utilisés pour les calculs liés à l'activité de surface et en profondeur. Une information de qualité et la possibilité de l'utiliser dans le modèle serait un avantage. Ainsi, une meilleure connaissance du caractère infiltrant des sols, non limitée à la correspondance des classifications belge et américaine, et de leurs qualités hydrodynamiques pourrait améliorer la qualité des résultats.

4. Il est à noter que l'effet de pompages excessifs sur l'existence d'intrusion d'eau salée n'est pas pris en compte dans le cadre de cette étude, les écoulements prenant part dans la zone saturée.

De plus, les sols étant souvent hétérogènes, une meilleure résolution spatiale serait avantageuse. Bien que cette information soit limitée en profondeur, l'analyse d'images satellites multispectrales pourrait être utilisée en période sèche. En effet, les différents minéraux présents dans les sols transmettent plus ou moins la lumière. Une analyse spectrale pourrait notamment donner une information sur la proportion d'argile dans les sols latérisés (Ibrahim et al., 2018).

Amélioration des données d'eau utile

L'analyse de sensibilité a permis de montrer que les choix relatifs à la recharge avaient des effets importants sur le modèle. Les paramètres climatiques, plutôt que d'être extrapolés à l'ensemble du bassin à partir d'une valeur unique, pourraient être liés à plusieurs points stratégiquement choisis. Ainsi, la différence de pluviométrie entre le Nord et le Sud de la zone d'étude pourrait être représentée. La délimitation de la zone d'influence de chaque station pourrait être réalisée avec la méthode des polygones de Thiessen.

Aussi, la valeur de stock pourrait être dépendante du type de sol rencontré. Une étude plus approfondie sur les comportements de ceux-ci et de l'étendue d'influence de l'évapotranspiration pourrait améliorer le modèle.

Amélioration des données de piézométrie

Le modèle ne tient pas compte des variations locales de piézométrie. En effet, le caractère drainant des Niayes décrit par Faye (2017) n'est pas décrit par le modèle réalisé. Les changements de profondeur d'eau liés à l'exploitation des ouvrages ne sont pas non plus étudiés. Ces variations minimales, bien qu'existantes, ne devraient pas affecter le modèle général de manière importante.

De plus, la carte piézométrique a été réalisée sur la base de valeurs de profondeur d'eau en période sèche afin d'utiliser un nombre optimal de valeurs de la manière la plus cohérente possible. Cette approche a cependant le désavantage d'être une vision optimiste. En effet, une analyse basée sur des niveaux d'eau en période de mousson présenterait des temps de transfert plus faibles.

Aussi, identifier les Niayes et y imposer une vulnérabilité maximale pourrait ajouter des zones sensibles qui demandent plus de suivi.

Finalement, l'étude de l'existence d'une recharge favorisée artificiellement dans les zones de cultures irriguées pourrait, comme le montre la Figure 2.28, apporter des résultats importants dans le cadre d'une analyse de risques.

Amélioration des données géologiques

Le manque de bibliographie concernant les paramètres hydrodynamiques des couches géologiques a contraint d'utiliser les valeurs de matériaux wallons connus. Ces paramètres étant souvent fonction de la qualité de la roche, des études supplémentaires devraient être conduites pour mieux représenter la géologie in situ. Par exemple, la valeur de porosité dans les calcaires de Lam Lam correspond à des calcaires fortement fracturés comme l'indiquait Roger et al. (2009). Ces fracturations semblent en accord avec la situation géologique proche du Horst de Diass. L'intensité de la karstification n'est cependant pas connue et est certainement différente de celle des calcaires wallons, le climat y étant différent.

Un autre atout pourrait être la représentation des failles identifiées sur la carte géologique comme étant des zones d'infiltration préférentielle.

Il est toutefois important de noter qu'une étude cartographique de vulnérabilité ne peut jamais avoir pour objectif de se substituer à une étude complexe avec modélisation mathématique (Popescu et al., 2004). Ce travail sert alors de première approche, à grande échelle, pour identifier les zones nécessitant des recherches approfondies.

Il ne s'agit que d'un modèle, une simplification de la réalité pour comprendre la mécanique générale de la zone d'étude. Apporter une complexité importante, reposant toujours sur plus d'hypothèses, peut alors diminuer la légitimité du travail.

Il faut de plus noter que cette étude de vulnérabilité cherche à connaître la vulnérabilité de la ressource. Le parcours du contaminant depuis la nappe vers un possible récepteur n'est pas pris en compte.

La vulnérabilité de l'aquifère supérieur décrite, le chapitre suivant répertorie les différentes pressions possibles existant en surface dans la continuité de l'approche "Émetteur-Trajet-Récepteur".

Chapitre 3

Aléa-pression

Le chapitre précédent a permis d'identifier les zones de l'aquifère les plus sensibles à travers le concept de vulnérabilité intrinsèque. Ces résultats ne prennent cependant pas en compte le scénario de pollution. Celle-ci peut être diffuse sur l'ensemble du bassin comme une contamination aux nitrates à la suite d'une mauvaise gestion de l'activité agricole, ou ponctuelle à travers une source de pollution locale. Les deux scénarii ne concernent pas les mêmes contaminants et présentent des profils de pollution dans le temps et dans l'espace bien distincts.

Le calcul de cartes de vulnérabilités spécifiques étudie les effets théoriques d'un contaminant donné sur le système souterrain. En théorie, une carte devrait être réalisée pour chaque contaminant à l'aide de la vulnérabilité intrinsèque et des caractéristiques de celui-ci (interactions avec le milieu souterrain, durée de vie, ...).

Cependant, au vu de la taille importante de la zone d'étude et des nombreux scénarii de pollutions possibles, trop de cartes devraient être réalisées. L'analyse d'un grand nombre de cartes, toutes relatives à un seul contaminant perd de son sens dans le cadre d'un travail comme celui-ci.

Plutôt que de calculer toutes ces cartes de vulnérabilité spécifique, ce chapitre étudie les possibles sources de contamination et les met en relation avec la carte de vulnérabilité intrinsèque obtenue précédemment. Cette méthode, qui s'inscrit dans la continuité du concept "Émetteur-Trajet-Récepteur", permet de créer une carte unique pour identifier les zones requérant une attention particulière. En effet, le suivi d'une zone portant une vulnérabilité élevée n'a de sens que si un aléa existe en surface. Pour ce travail, ce terme d'aléa sera préféré en raison du caractère incertain de la contamination.

La carte de vulnérabilité a été calculée par simulation d'un pulse de contaminant s'infiltrant dans le sous-sol. Cette méthode correspond à une contamination locale plutôt que diffuse, plus allongée dans le temps. Trois types d'émetteurs capables d'influencer la qualité de l'eau souterraine sont alors répertoriés dans ce chapitre :

- Les activités industrielles et minières : celles-ci, à travers les rejets et l'exploitation du sous-sol, peuvent affecter le système aquifère.

- Les zones urbaines : ces zones, en plus d'être des "Récepteurs" en exploitant l'eau des puits, sont des possibles sources de contamination. En effet, Faye et al. (2019) a révélé grâce à une étude isotopique et bactériologique une contamination de l'aquifère supérieur dans la région de Thiaroye. Une mauvaise gestion des fosses septiques dans une région urbanisée a entraîné des concentrations élevées en nitrates dans l'eau souterraine.

De plus, une exploitation intensive des puits le long du littoral peut entraîner des diminutions du niveau d'eau et ainsi induire des intrusions d'eau de mer (DGPPE, 2020).

– Les champs de culture intensive : la zone des Niayes, réputée pour sa production de fruits et légumes, peut présenter des concentrations en nitrates et pesticides au delà de la norme de potabilité à proximité des champs irrigués. En effet, les agriculteurs (analphabètes pour la majorité) ne savent pas suivre les recommandations d'utilisation des pesticides. Aussi, ils s'approvisionnent souvent au marché noir où les substances, pourtant interdites par la législation sénégalaise, sont disponibles (CERES, 2017 ; Cisse et al., 2003 ; Diop, 2013 ; Diop et al., 2012 ; Ngom et al., 2012).

Ce chapitre répertorie d'abord les différentes sources susceptibles de contaminer le système avant de proposer une carte résumant les aléas de surface identifiés. Au final, une carte reprenant les aléas, les récepteurs et la vulnérabilité est présentée.

3.1 Application à la zone des Niayes : Description des données

Cette section présente l'origine des données utilisées pour réaliser la carte des aléas.

3.1.1 Mines et industries

Les ressources minières et industrielles de la zone des Niayes ont été obtenues de la société belge *SHER*, responsable d'un projet avec la DGPRE sur le Bassin Arachidier. Celui-ci consiste en la caractérisation de la qualité de l'eau souterraine et de surface sur l'ensemble du bassin (DGPRE, 2020).

Il est important de noter que, la zone d'étude étant étendue et les villages souvent peu habités, toutes les industries ne sont sûrement pas répertoriées.

Parmi les vingt-cinq mines considérées, dix-sept sont exploitées pour la tourbe, deux pour la kaolinite (une argile constituant la couche supérieure du profil latéritique exploitée pour réaliser de la céramique (Arndt et al., 2016)), une pour les sables à zircon et titane, une pour les matériaux de construction et quatre pour les phosphates d'alumine. Ces dernières sont les plus importantes en terme de surface et d'impact sur l'environnement. D'ailleurs, la mine de Darou Khoudoss, près de Mboro, recouvre une surface de trente kilomètres carrés et est visible depuis l'image satellite Figure 1.1 (Mindat, 2021).

Trois grandes industries ont été répertoriées dans la zone des Niayes : une industrie pétrolière dans la commune de Lompoul, une industrie de verrerie dans la commune de Kab Gaye et une industrie agro-alimentaire dans la commune de Kayar.

3.1.2 Zones urbaines et d'agriculture intensive

Ces zones ont déjà été identifiées dans la carte 2.4 grâce aux images satellites de l'ESA utilisées pour le projet Copernicus (Copernicus, 2021). Seules les zones de cultures irriguées et urbaines ont été conservées parmi l'important panel de la classification.

En raison de la faible taille des villages et de la résolution de trois cents mètres de Copernicus, les localités ont aussi été répertoriées. Celles-ci ont aussi été distribuées par *SHER*.

3.1.3 Carte aléas de surface

Les éventuelles pressions de surface sur l'aquifère supérieur répertoriées sont alors présentées Figure 3.1.

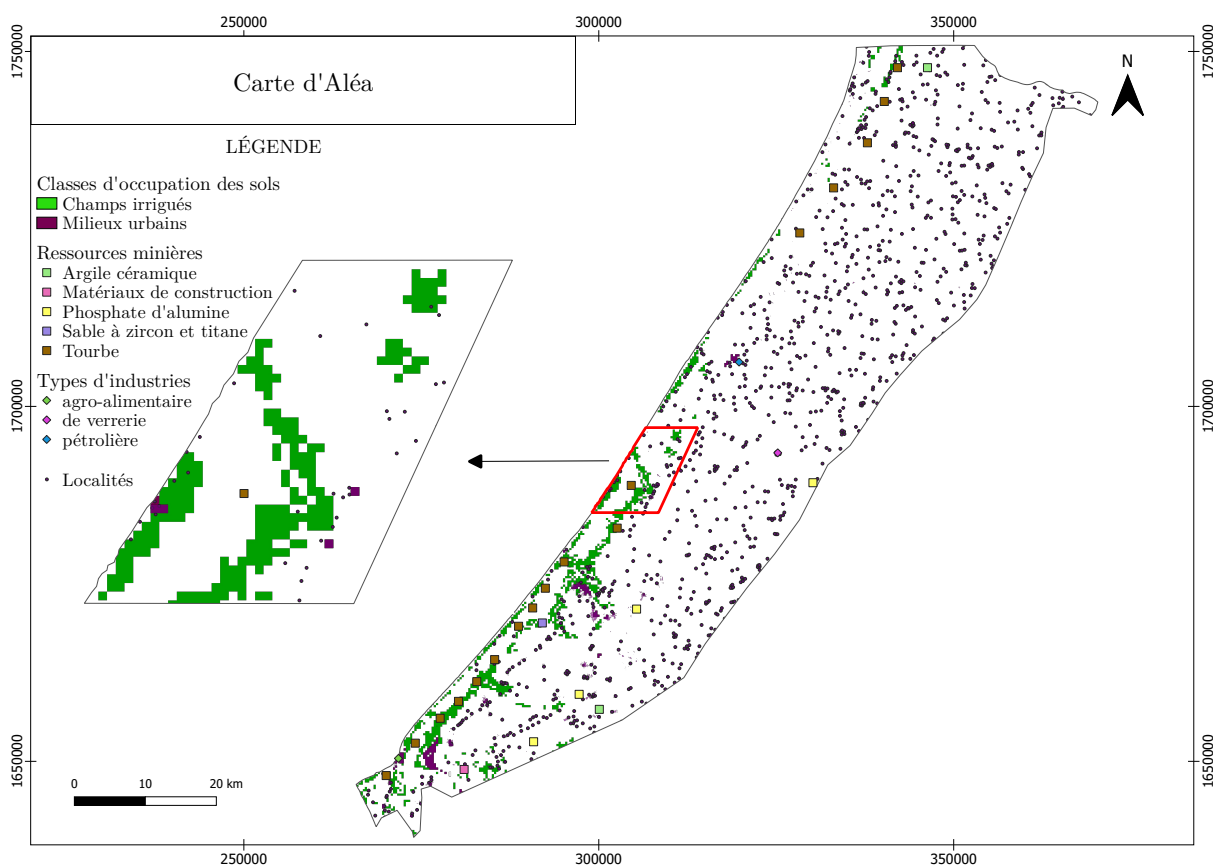


FIGURE 3.1 – Carte des aléas de surface

Comme cité précédemment, les cultures irriguées longent le littoral. En effet, la qualité du sol et la faible profondeur de l'aquifère y permettent une culture intensive de fruits et légumes (Ndiaye, 2018).

Le projet Copernicus propose des données à une résolution de 300 mètres. Les champs des agriculteurs ne dépassent cependant pas les 5000 mètres carrés (Ndiaye, 2018). Il est donc possible que des champs irrigués plus reculés ne soient pas identifiés correctement ou qu'une surface trop importante soit allouée pour un champ de petite taille. Ce chapitre étudiant les pollutions ponctuelles, une identification des cultures avec une meilleure résolution spatiale apporterait plus de nuances aux résultats obtenus.

Dans cette optique, la section suivante exploite des images multispectrales de Sentinel-2 pour identifier les zones de culture irriguées avec une meilleure précision. D'abord, une brève description du satellite est présentée. Ensuite, les images en vraies et fausses couleurs sont générées. Enfin, des combinaisons spectrales sont proposées pour obtenir le résultat final.

3.2 Utilisation d'images multispectrales pour détecter les zones de cultures irriguées

3.2.1 Description de Sentinel-2

La mission Sentinel-2 mise en place par l'agence spatiale européenne consiste en deux satellites munis de caméras multispectrales. Leurs trajectoires sont similaires mais décalées de 180° , ce qui permet de diviser le temps de retour par deux. La terre est ainsi entièrement photographiée environ tous les 10 jours (Sentinel, 2021).

Les bandes capturées par les satellites sont présentées Tableau 3.1. La "full width at half maximum" (FWHM) représente la taille de la bande analysée à la moitié de sa réponse maximale. En effet, les caméras ne peuvent jamais capturer une longueur d'onde précise mais analysent plutôt un ensemble de celles-ci. Au plus cet ensemble est petit i.e. FWHM diminue, meilleure sera la résolution sensorielle de l'appareil.

Bande	Longueur d'onde centrale [nm]	FWHM [nm]	Résolution spatiale [m]
b1	443	20	60
b2	490	65	10
b3	560	35	10
b4	665	30	10
b5	705	15	20
b6	740	15	20
b7	783	20	20
b8	842	115	10
b8A	865	20	20
b9	945	20	60
b10	1375	30	60
b11	1610	90	20
b12	2190	180	20

TABLE 3.1 – Caractéristiques de l'appareil multispectral de Sentinel-2 (Sentinel, 2021)

Quatre images ont été utilisées pour couvrir les Niayes dans leur entièreté. Ces images ont toutes été prises le 17 mai 2021 à 11h30. Cette date a été choisie pour deux raisons.

D'abord, parce qu'elle correspond au pic de production des cultures irriguées. En effet, pour analyser les champs irrigués, ceux-ci doivent être assez développés. La saison des pluies étant finie depuis le mois de novembre, peu de végétation est présente dans la zone. Les cultures irriguées, bénéficiant d'un apport en eau, se sont toutefois développées pour la récolte de juin (Bontemps, 2019).

Ensuite, parce qu'il n'a pas plu depuis deux semaines (WWO, 2021). L'absence de couverture nuageuse et de pluie récentes procure une meilleure qualité de données. Cette eau pourrait absorber de la lumière et ainsi ne pas représenter l'état du sol, mais bien celui du ciel.

3.2.2 Image en vraie et fausse couleur

L'appareil analyse de manière passive la réflectance du milieu à certaines longueurs d'onde. En pratique, la lumière du soleil émet une multitude de longueurs d'onde en direction de la Terre. Celles-ci sont soit absorbées, soit transmises en fonction de la matière avec laquelle elles entrent en contact. Les ondes non absorbées sont retransmises et mesurées par les capteurs du satellite.

Sentinel-2 possède douze capteurs là où l'œil n'en possède que trois (rouge, vert et bleu). Les réflectances mesurées des bandes 4, 3 et 2 permettent de reconstruire une image naturelle i.e. en vraie couleur RGB (Figure 3.2). Par exemple, la chlorophylle des plantes absorbe très bien les longueurs d'onde de 490 et 665 nm et transmet plus autour de 560 nm. Cette dernière correspond au vert pour les humains. Le satellite, comme l'œil, mesure la quantité de lumière transmise pour ces trois bandes. Si une mesure importante est prise pour la bande 3, ce pixel aura une couleur plus verte dans la reconstruction de l'image.

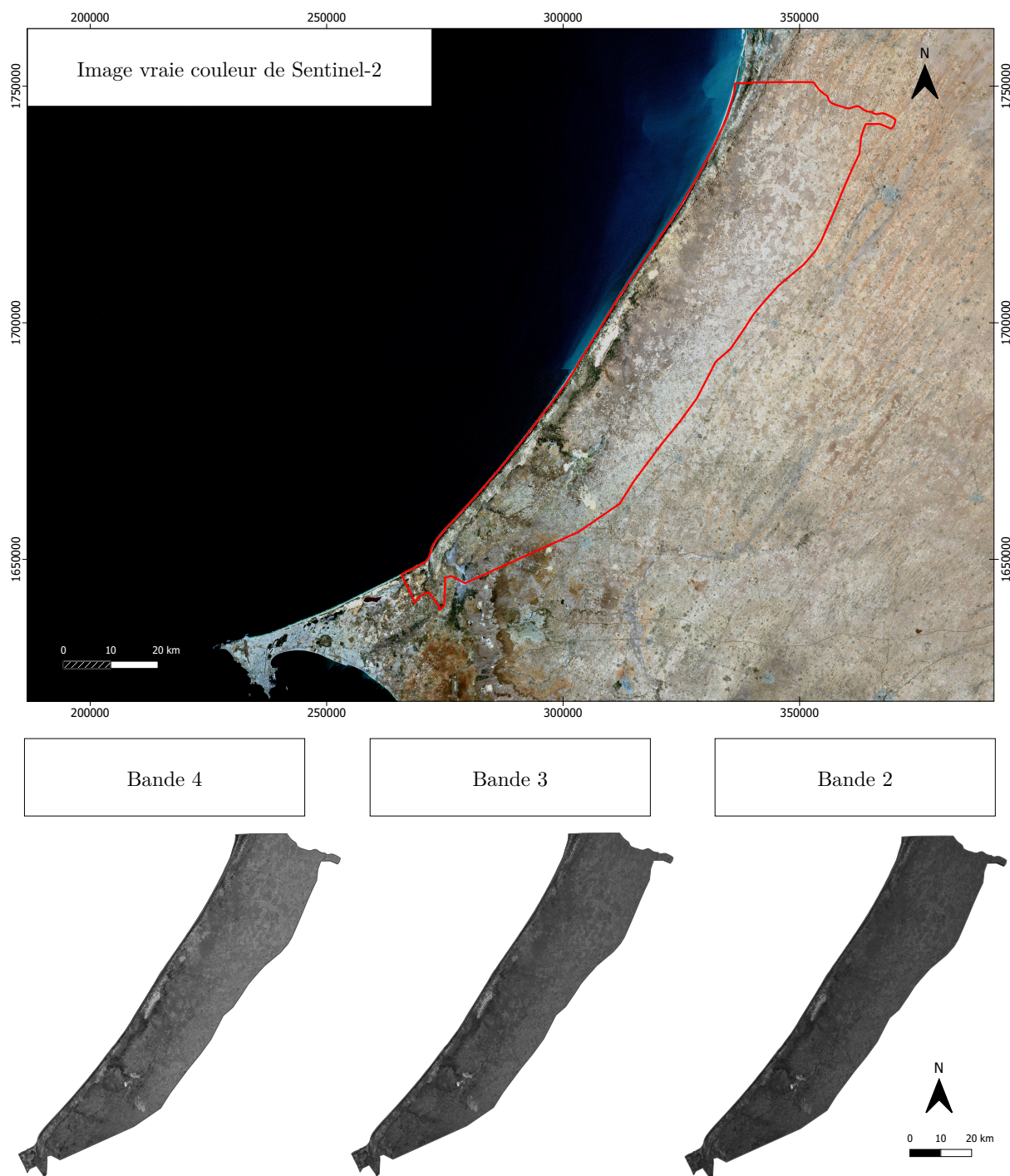


FIGURE 3.2 – Image RGB et bandes 4, 3 et 2 mesurées par Sentinel-2

L'avantage des caméras multispectrales est qu'elles ne s'arrêtent pas à une simple image en vraie couleur mais permettent de faire la distinction entre deux matières différentes qui renvoient pourtant la même réponse pour les bandes 4, 3 et 2. En effet, en utilisant d'autres bandes pour reconstruire une image, une nouvelle source d'information est disponible. Comme pour l'image précédente, chaque bande est attribuée soit au rouge, soit au bleu, soit au vert pour obtenir une image en fausse couleur.

Il est possible d'utiliser des bandes qui offrent des réponses sensiblement différentes pour obtenir plus de nuances. Les bandes 2 et 3 semblent renvoyer les mêmes données, une des deux bandes pourrait être remplacée pour augmenter la quantité d'information. Toute matière renvoie un spectre bien défini (Figure 3.3)¹. Le choix de bande peut donc se faire pour mettre en évidence un matériau dont la réponse spectrale est connue. Ainsi, la végétation semble réfléchir la lumière dans l'infrarouge proche (bande 8). Cette bande peut alors remplacer la bande 2. De plus, en utilisant la bande 8 pour le rouge, les zones de végétation importante attirent l'attention avec des couleurs rougeâtres qui ne paraissent pas naturelles. La nouvelle image générée est présentée Figure 3.4.

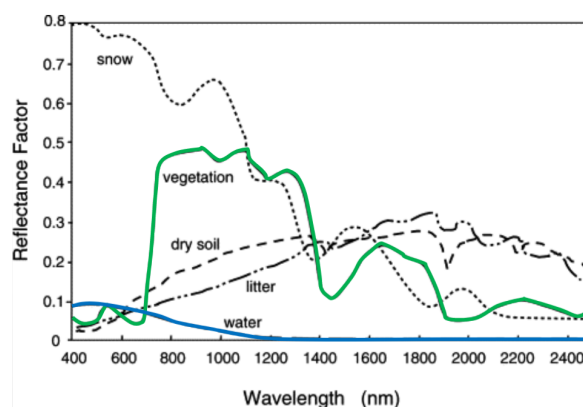
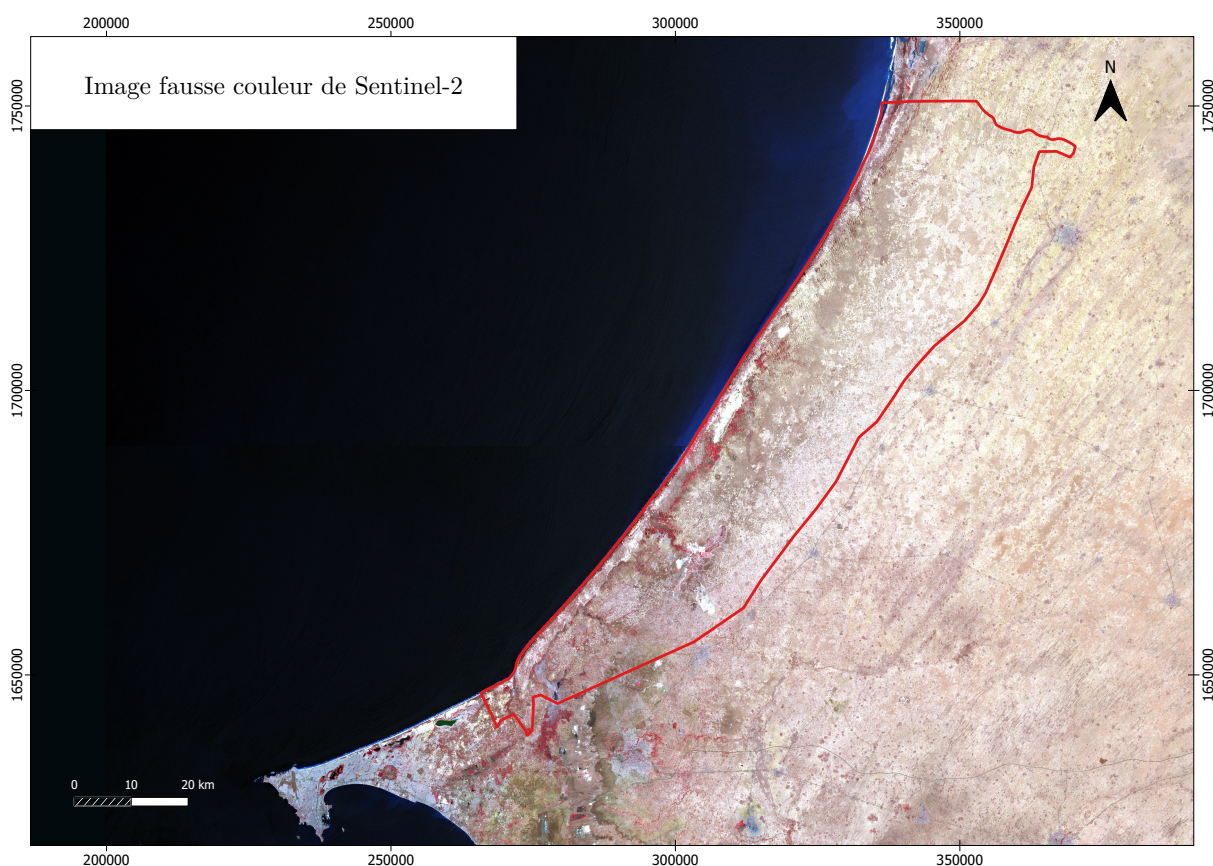


FIGURE 3.3 – Réponse spectrale de différents matériaux (Pirard, 2020)



1. Il est à noter que l'allure générale des courbes est plus importante que les valeurs de réflectance, celles-ci étant aussi fonction de l'orientation du soleil.

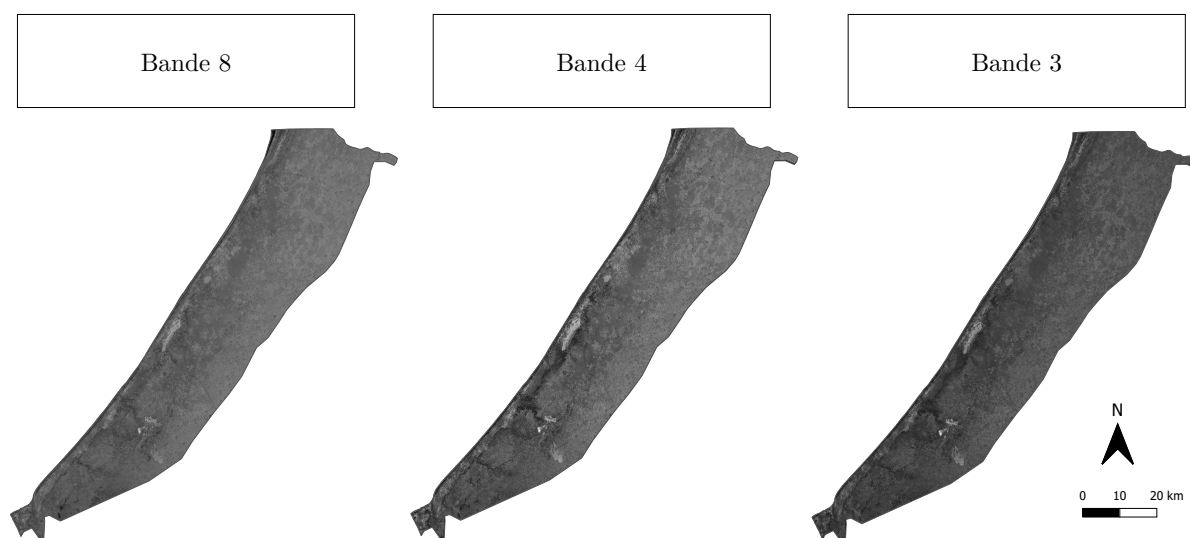


FIGURE 3.4 – Image en fausse couleur et bandes 8, 4 et 3 mesurées par Sentinel-2

Dans le cadre d'une analyse de la végétation, quatre combinaisons sont souvent utilisées afin d'obtenir un maximum d'information. Celles-ci se basent sur deux concepts : les champs en bonne santé sont composés de chlorophylle, qui donnent leur couleur verte aux plantes et, si celles-ci sont bien entretenues, elles sont composées d'eau (Bontemps, 2019). Le premier se traduit par des réflectances élevées pour les bandes 3 (vert) et 8 (NIR), et la deuxième par des réflectances faibles dans le SWIR (short wave infrared) des bandes 11 et 12, l'eau étant fort absorbante dans ces longueurs d'ondes (NASA, 2014 ; Ambrasone et al., 2020).

Les 4 combinaisons de bandes sont présentées ci-dessous et illustrées à travers l'exemple appliqué au niveau du village de Mboro Kiando :

- Vraie couleur (RGB : B4,B3,B2) : Elle correspond à ce que l'œil humain interprète. La végétation, qui reflète plus la bande 3 que les deux autres, apparaît en vert.
- Fausse couleur (RGB : B8,B4,B3) : Comme décrit précédemment, la végétation apparaît dans des nuances de rouges, la réflectance de la bande 8 étant bien plus élevée que les autres (Figure 3.3) ;
- SWIR (RGB : B12,B8A,B4) : Cette combinaison, en utilisant la bande 12 fort absorbée par l'eau, permet d'identifier l'humidité des sols (NASA, 2014). Si la végétation possède une teneur en eau élevée, celle-ci va plus absorber dans la bande 12. La végétation apparaît alors verte grâce à la forte réflectance dans la bande 8² ;
- Agriculture (RGB : B11, B8, B2) : Cette combinaison, alternative de la précédente, reflète la santé des champs. Ceux-ci apparaissent aussi en vert sur l'image (NASA, 2014).

La Figure 3.5 permet d'observer les différents résultats. Ainsi, là où tous les types de végétation apparaissent avec des couleurs très foncées et difficiles à distinguer en vraie couleur, les nouvelles combinaisons permettent une meilleure compréhension de la scène.

2. B8A et B8 sont fort rapprochées et sont souvent assimilées à la même bande. Les deux existent pour optimiser la correction atmosphérique (Pirard, 2020).

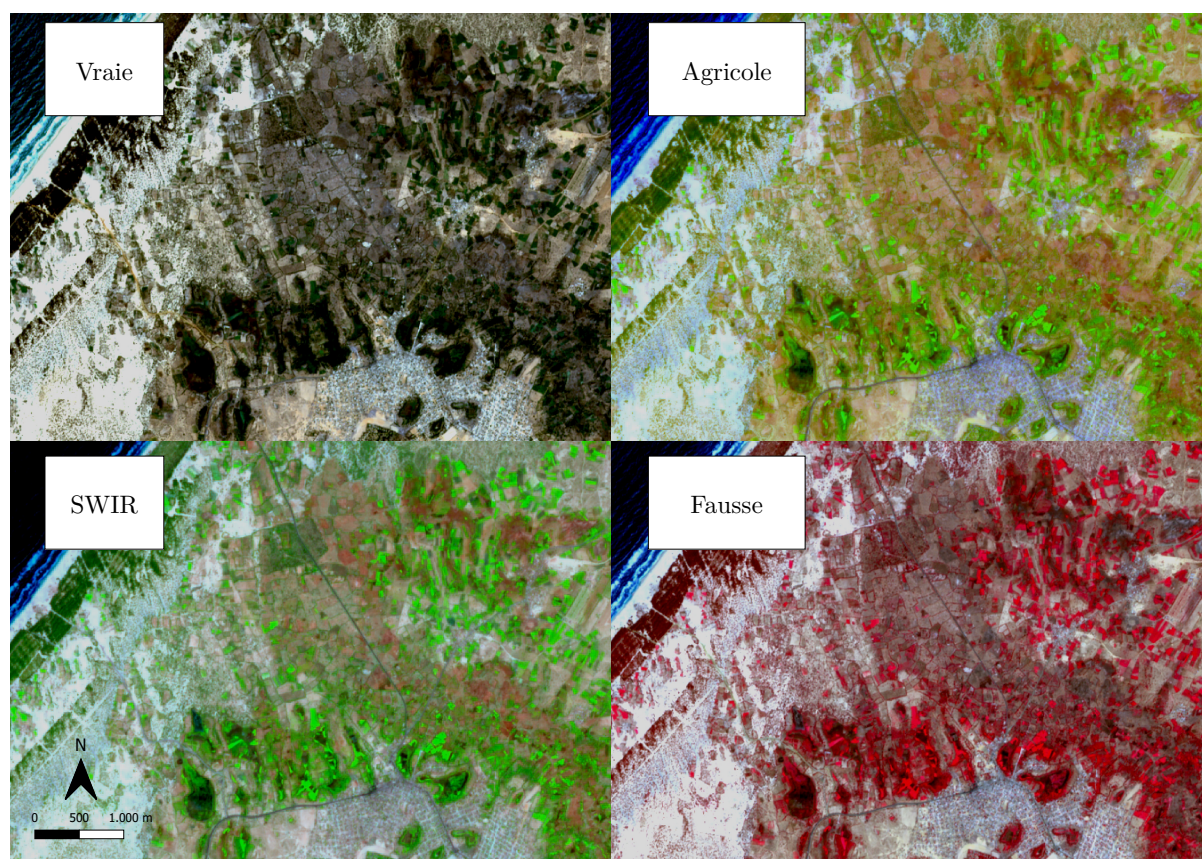


FIGURE 3.5 – Illustration des 4 combinaisons de couleurs pour identifier la végétation

3.2.3 Combinaison spectrale

Bien que les images en fausse couleur amènent plus de visibilité sur la zone d'étude, il est difficile d'en extraire de manière systématique des informations. En effet, les valeurs de réflectance étant aussi fonction de l'orientation du soleil, travailler avec des intervalles pour ces valeurs sur une grande zone d'étude peut être compliqué.

Pour pallier à ce problème, il est possible de calculer des indices normés pour chaque pixel sur base des valeurs de réflectance de certaines bandes. Cette sous-section exploite les résultats des indices NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) et NDWI (Normalized Difference Water Index). De plus, ceux-ci permettent de faire intervenir les deux concepts liés à la chlorophylle et à l'eau de manière plus univoque et scientifique.

Pour présenter les deux indices, la Figure 3.6 a été réalisée. Les valeurs de réflectance mesurées par Sentinel-2 sont présentées pour des pixels dont l'occupation est connue. Ces mesures sont en accord avec la Figure 3.3 utilisée précédemment. L'eau absorbe bien dans l'infrarouge lointain et influence la réflectance des champs en bonne santé. De plus, ceux-ci reflètent bien dans l'infrarouge proche en comparaison des champs en jachère.

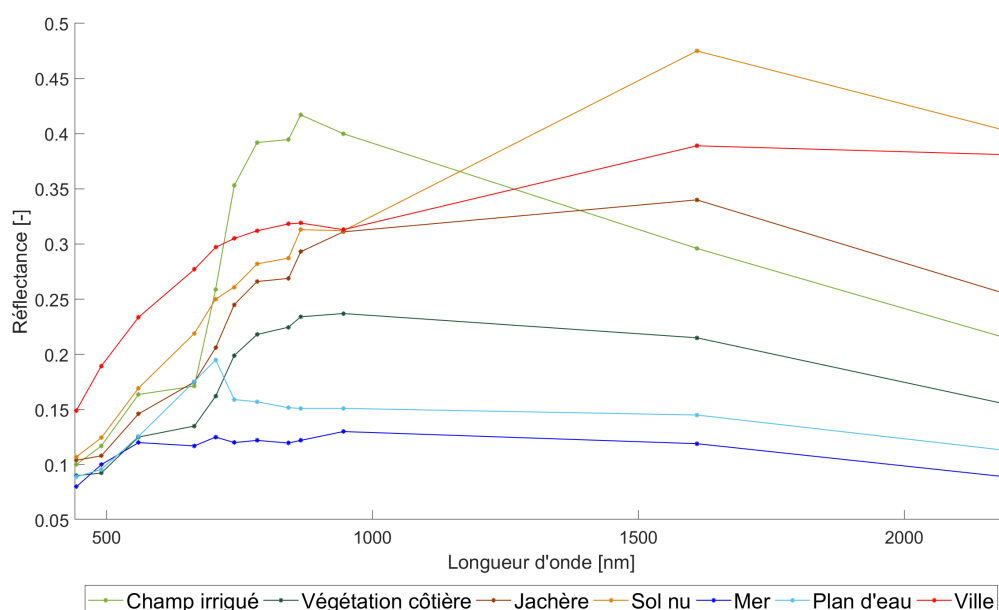


FIGURE 3.6 – Réponse spectrale de pixels connus

NDVI

Le NDVI est l'indice le plus utilisé en terme d'analyse de végétation. Celui-ci se calcule selon :

$$NDVI = \frac{NIR - Rouge}{NIR + Rouge} = \frac{B8 - B4}{B8 + B4} \quad (3.1)$$

La Figure ci-dessus montre que la différence entre les bandes 4 et 8 est la plus importante pour une végétation dense. Un indice élevé peut ainsi révéler la présence des champs de culture intensive (Ambrosone et al., 2019).

NDWI

L'indice de végétation peut présenter certaines limitations lorsque plusieurs types de plante sont présents. Entre les années 1948 et 1990, une barrière forestière de Filao a été implantée le long du littoral afin de préserver les villages situés sur les dunes d'une érosion éolienne (DGPRE, 2014). Ces plantes peuvent être confondues avec les champs à certains endroits. Pour répondre à ce problème, l'indice NDWI est aussi employé. Celui-ci représente la quantité d'eau présente dans les sols avec

$$NDWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} = \frac{B8A - B11}{B8A + B11} \quad (3.2)$$

Les agriculteurs arrosent leurs champs le matin, avant que le soleil ne soit trop intense (Ndiaye, 2018). En plus de l'eau présente dans les plantes, celle dans les sols va alors absorber les ondes SWIR tandis que la chlorophylle va transmettre les ondes NIR. La Figure 3.6 montre aussi que la différence entre les bandes 8A et 11 est maximale pour la végétation des champs irrigués (NASA, 2014).

Les cartes de ces indices sont présentées Figures 3.7 et 3.8. Au final, ils ont été combinés en considérant une valeur minimale pour chacun d'eux. Ainsi, les pixels identifiés contiennent à la fois de la chlorophylle et de l'eau. Ces valeurs, choisies par essai-erreur en comparant les résultats aux images satellites de Google dont la résolution spatiale est meilleure, et sur la base de Ambrosone et al. (2019), sont respectivement de 0,4 et 0,3 pour le NDVI et le NDWI.

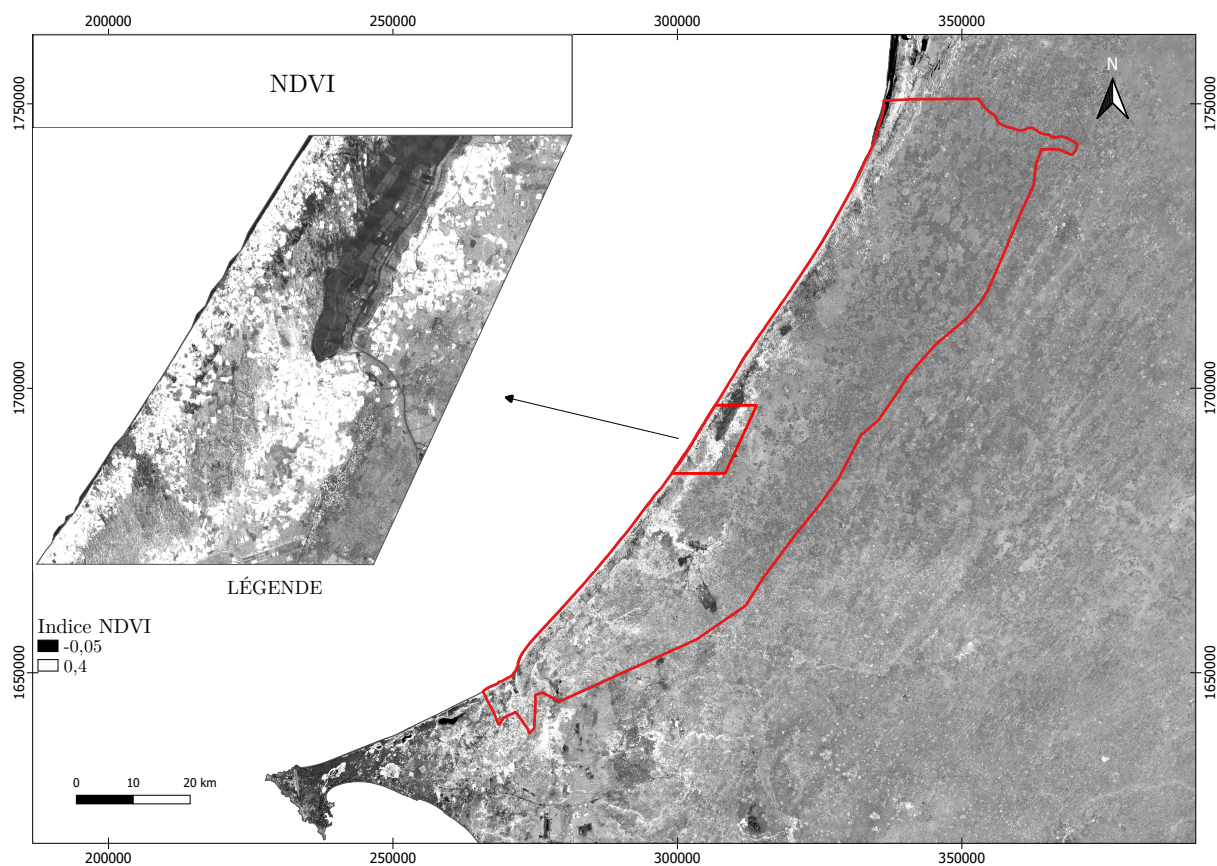


FIGURE 3.7 – Carte des indices NDVI

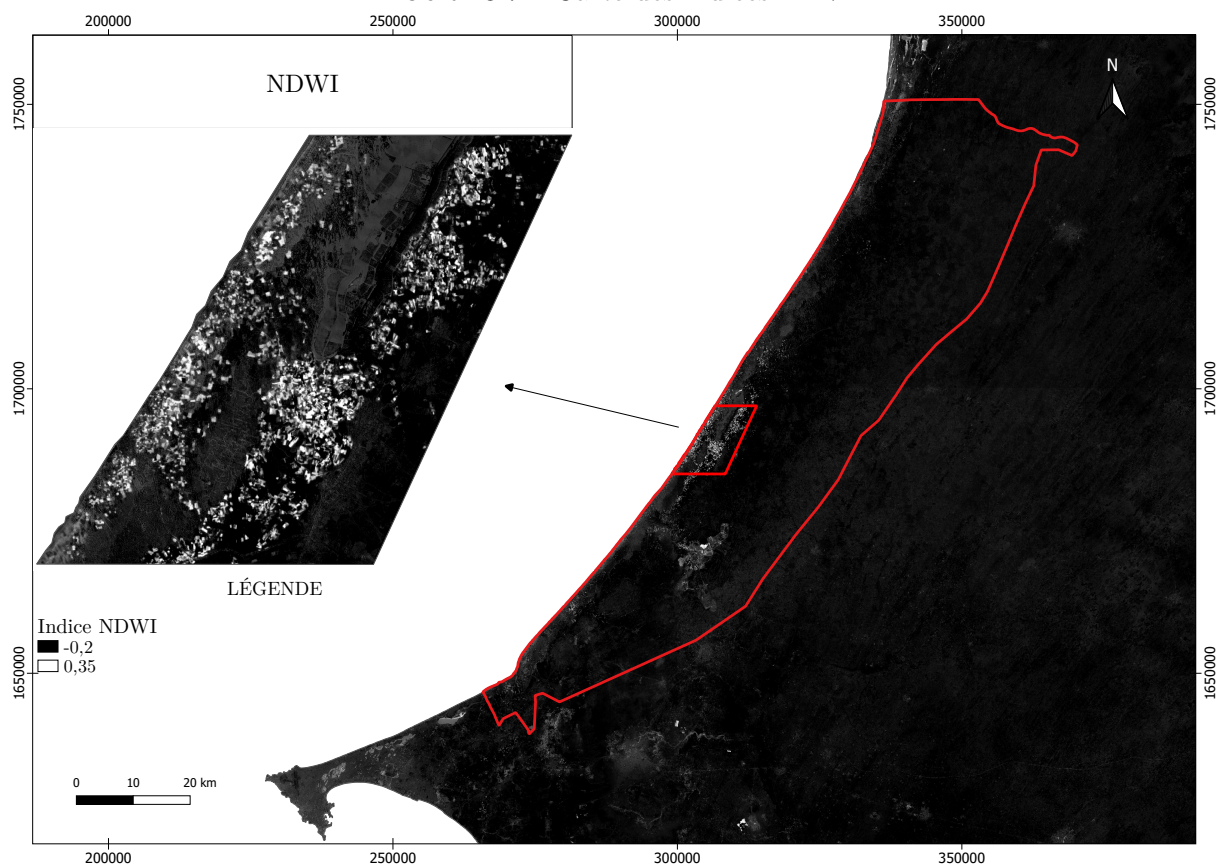


FIGURE 3.8 – Carte des indices NDWI

3.3 Application à la zone des Niayes : Résultats

La nouvelle carte mise à jour est proposée carte 3.9. Bien que la limitation des cultures irriguées semble à présent plus précise, les résultats sont moins visibles. En effet, la résolution spatiale des cultures irriguées est passée de 300 à 10 mètres. Les champs de petite taille sont alors représentés par une multitude de pixels délimitant avec précision les champs plutôt que de les représenter tous dans un seul pixel uniforme.

Pour améliorer les résultats, l'étude des indices NDVI et NDWI devrait être réalisée pour plusieurs images prises à des moments différents et les résultats devraient être rassemblés. En effet, tous les champs ne se développent pas, ou même ne sont pas cultivés au même moment. Plus de zones de cultures irriguées devraient alors être attendues.

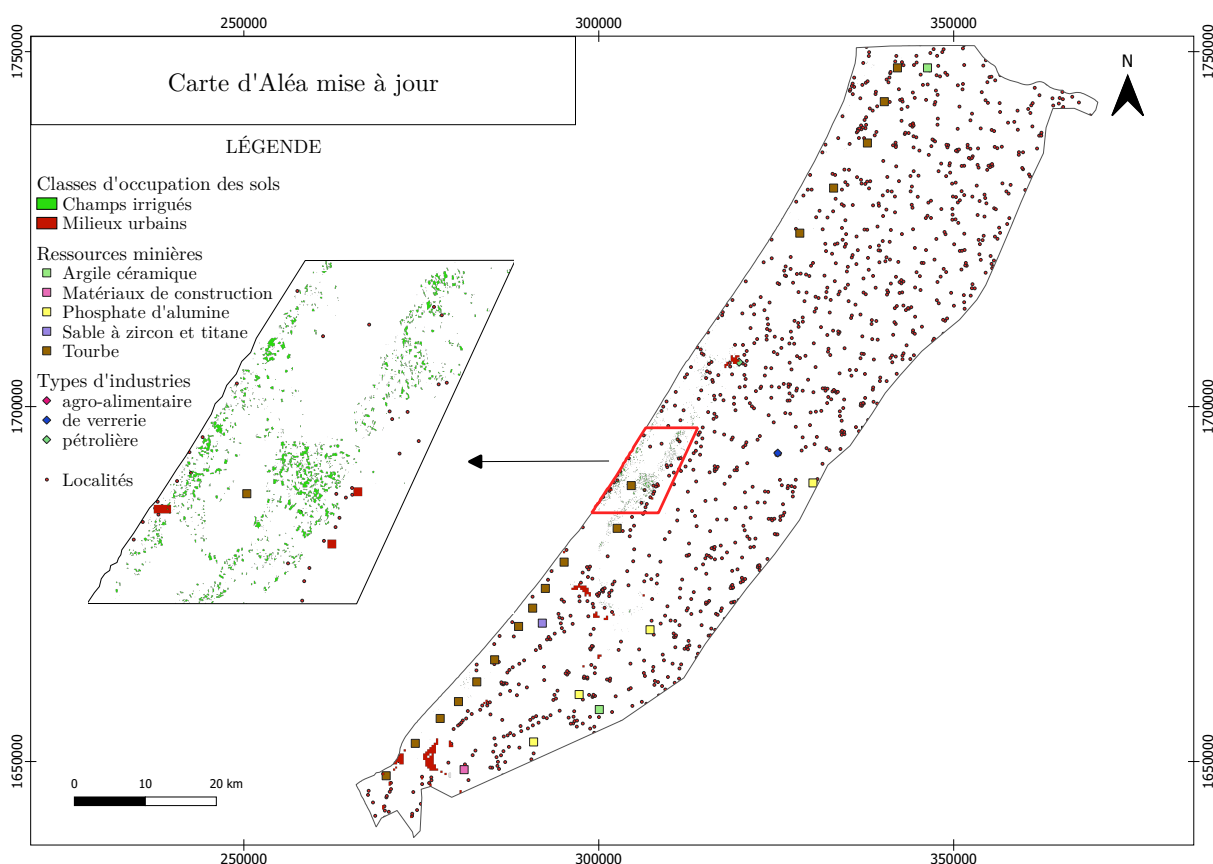


FIGURE 3.9 – Carte des aléas de surface mise à jour

Afin d'associer les cartes de vulnérabilité et d'aléas de manière visible, les données de champs irrigués utilisées proviennent une fois de plus de l'entreprise *SHER*. Celles-ci constituent un bon compromis en terme de qualité et de résolution tout en permettant d'identifier correctement les zones recherchées. La couche a, elle aussi, été réalisée sur la base d'images de Sentinel-2 prises entre mars et avril 2020.

De plus, une couche de résolution de 20 mètres identifiant les zones urbaines a été combinée à celle précédemment utilisée afin d'identifier les plus petits villages. Cette couche provient de ESA CCI Copernicus 2016 et traitée sur le site web d'accès aux données par *SHER*.

À partir des résultats des trois chapitres, la carte finale au format A4 a pu être obtenue. En effet, celle-ci combine les puits répertoriés au chapitre un, les temps de transfert minimaux du chapitre deux et les aléas décrits dans ce troisième chapitre. La combinaison a ainsi permis de réaliser une carte représentant à la fois les "Émetteurs", le "Trajet"³ et les "Récepteurs".

Dans les terres, le risque⁴ semble peu élevé malgré un grand nombre de puits répertoriés. En effet, deux conséquences découlent de l'augmentation de la profondeur de l'aquifère dans cette zone :

- la culture artisanale à petite échelle est moins économique et donc moins présente ;
- les temps de transfert, suivant une vitesse d'infiltration d'un mètre par an, augmentent rapidement.

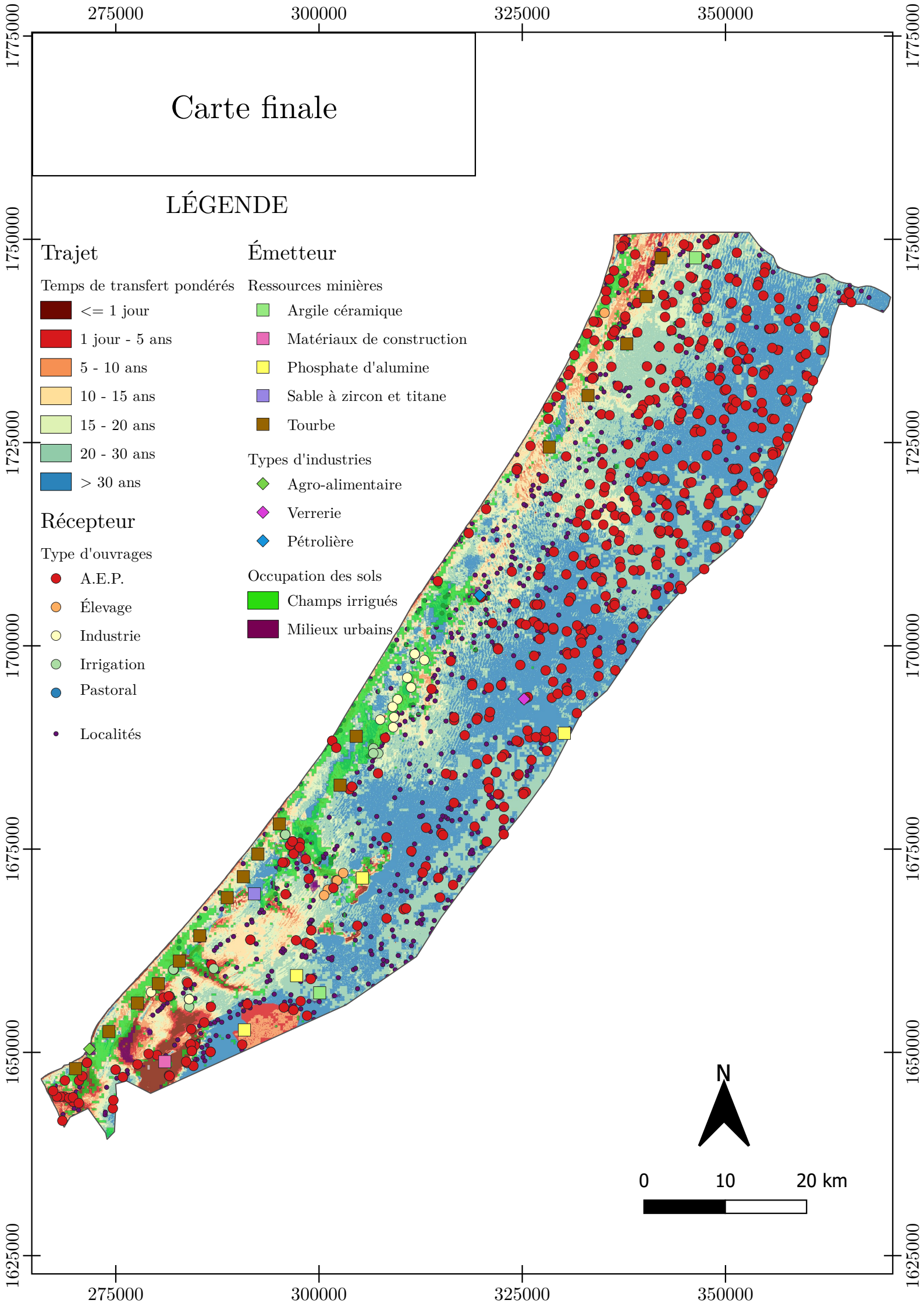
En l'absence d'aléas, à l'exception de la possibilité de contamination au sein même des puits liée à une mauvaise gestion de ceux-ci (contamination aux nitrates ou bactériologique), le danger diminue. Aussi, l'absence de cultures diminue les chances d'existence d'une recharge artificielle susceptible de contaminer la nappe plus rapidement.

Finalement, le littoral, Darou Khoudoss et les anciennes vallées au sud semble être les zones les plus à risque en terme de protection de l'aquifère. En effet, ces zones associent des temps de transferts plus faibles et des aléas en surface avec les cultures irriguées, celles-ci étant susceptibles d'augmenter les vitesses d'écoulement grâce à une recharge artificielle.

Il semble que moins de puits soient répertoriés à proximité des cultures irriguées que dans les terres. Cela peut s'expliquer par le caractère incomplet des données de puits. Tous les puits des cultivateurs ne sont pas répertoriés correctement dans la base de données. La présence de puits semble cependant évidente pour permettre l'irrigation de ces champs, la plupart ne dépassant pas les 5000 mètres carrés et irrigués de manière artisanale (Ndiaye, 2018).

3. Il est à noter que le trajet n'est pas celui entre les émetteurs et les récepteurs mais bien celui entre une pollution fictive en surface et l'aquifère après pondération des différents scénarii d'infiltration, le transport de contaminant à travers la zone saturée n'étant pas considéré.

4. Le risque décrit ici n'est pas un calcul lié à une classification des phénomènes de vulnérabilité, aléa et conséquences mais correspond simplement au risque au sens stricte.



Chapitre 4

Conclusion

Ce travail constitue la première étape dans l'étude de protection de l'aquifère supérieur des Niayes. En effet, celui-ci étudie les mécanismes hydrogéologiques responsables des conditions de celui-ci. Il permet, dans une première approche, d'identifier les zones les plus sensibles pour le système, nécessitant des recherches approfondies en terme de caractérisation de contamination anthropique.

D'abord, le contexte général de la zone d'étude a été décrit à travers des analyses géographique, hydraulique, géologique et hydrogéologique. De plus, l'état général de contamination des Niayes, exploitées intensivement pour l'agriculture, en nitrates et pesticides a été abordé. Celles-ci semblent présenter des puits localement contaminés en pesticides au pieds des champs en plus de concentrations élevées en nitrates. Il est cependant difficile d'identifier la raison de ces concentrations, pouvant aussi être causées par une mauvaise gestion du puits.

Ensuite, la méthode *APSÛ* a été développée pour la zone d'étude. Les concepts derrière celle-ci ont dans un premier temps été décrits. Dans un second temps, l'origine des données nécessaires a été discutée. Dans un troisième temps, les résultats ont été présentés avant de mener une étude de sensibilité. Les temps de transferts minimaux pondérés, représentant le temps nécessaire pour que le contaminant s'écoule depuis la surface jusqu'à la zone saturée après pondération des différents scénarii d'infiltration, ont été choisis pour représenter la capacité de l'aquifère à atténuer une contamination. En l'absence de rivière pérenne et au vu de la faible recharge, seules les zones de nappe affleurante semblaient présenter une vulnérabilité élevée. Cependant, après considération d'un gradient hydraulique imposé qui pourrait être représentatif d'une recharge artificielle dans les zones de cultures irriguées, des temps de transfert beaucoup plus faibles ont été observés, réduisant ainsi le temps moyen de 26 ans à 6 mois.

Des contaminations anthropiques ne seraient alors observables qu'à proximité des sources de recharge plus intense. En raison du manque de connaissance de la zone d'étude et de la simplification de modélisation, cette théorie ne peut être qu'une hypothèse demandant une recherche approfondie et un travail de terrain.

Finalement, les aléas de surface ont été répertoriés. Trois types ont été considérés : mines et industries, milieux urbains et cultures irriguées. Tous les résultats obtenus ont été rassemblés afin de créer une carte reprenant les possibles sources de contamination, la capacité de l'aquifère à atténuer celles-ci et les ouvrages répertoriés, possibles récepteurs de la contamination après son transport à travers les zones vadose et saturée.

Chapitre 5

Bibliographie & Annexes

5.1 Bibliographie

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M., 1998, FAO irrigation and drainage paper No. 56, Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements), 327 p.
- Ambrosonea, M., Matesea, A., Di Gennaroa, S.F., Tudoroiub, M., Genesioa, L., Migliettaa, F., Barontia, S., Maienzaa, A., Ungaroa, F., Toscano, P., 2019, Retrieving soil moisture in rainfed and irrigated fields using Sentinel-2 observations and a modified OPTRAM approach, Int J Appl Earth Obs Geoinformation, 89, ELSEVIER, 10 p., <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102113>.
- ANSD (Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie), 2016, Rapport projection de la population du Sénégal 2013-1063, pour la direction des statistiques démographiques et sociales, division du recensement et des statistiques démographiques, 168 p.
- Arndt, N., Ganino, C., Kesler, S., 2015, Ressources minérales, Dunod, deuxième édition, 216 p.
- Barusseau, J.P., Castaigne, P., Duvail, C., Noël, B.J., Nehlig, P., Roger, J., Serrano, O., Banton, O., Comte, J-C., Travi, Y., avec la collaboration de Sarr, R., Dabo, B., Diagne, E. & Sagna, R., 2009, Notice explicative de la cartographie multicouches à 1/50 000 et 1/20 000 de la zone d'activité du Cap-Vert, MINISTERE DES MINES, DE L'INDUSTRIE ET DES PME DIRECTION DES MINES ET DE LA GEOLOGIE, 246 p.
- Bontemps, S., 2019, Methods for cropland/crop type mapping from S2 and/or S1 time series - Day 2.2, EO Open Science, 1h27.
- Britannica, 2016a, Britannica, The Editors of Encyclopaedia, Home, Science, Earth Science, Geologic Time & Fossils, Earth Sciences, Luvisols, <https://www.britannica.com/science/Luvisol>
- Britannica, 2016b, Britannica, The Editors of Encyclopaedia, Home, Science, Earth Science, Geologic Time & Fossils, Earth Sciences, Leptosols, <https://www.britannica.com/science/Leptosol>.
- Brouyère, S., 2004, A Quantitative point of view of the concept of vulnerability. Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers, EUR 20912,

- European Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development, 10 p.
- Brouyère, S., Jeannin, P.-Y., Dassargues, A., Goldscheider, N., Popescu, I.C., Sauter, M., Vadillo, I., Zwahlen, F., 2001, Evaluation and validation of vulnerability concepts using a physically based approach. Dans : Proceedings of the 7th Conference on Limestone Hydrology and Fissured Media, Sci. Tech. Envir., Mém. H.S. 13, 67-72. Université de Franche-Comté, Besançon.
 - CERES, DPV Les Niayes Maraicheres, 2016, Etude de suivi du risque chimique environnemental et celle de la qualité sanitaire liée aux pesticides de synthèse du chou, de l'aubergine amère, du sol, de l'eau et de la tomate dans la zone des Niayes, Etude réalisée dans le cadre du PROJET 020/1 RA-RD/WAAPP2/FNRAA, Janvier 2016, 26 p.
 - CERES-LOCUSTOX (centre Régional de Recherche en Ecotoxicologie et Sécurité Environnementale), 2017, Rapport sur le suivi du risque chimique environnemental (eau et sol) et de la qualité sanitaire liée aux résidus de pesticides chimiques de synthèse dans les produits maraichers dans la zone des Niayes, PROJET "DEVELOPPEMENT DE SYSTEMES D'ALERTE SUR LES RISQUES SANITAIRES LIES AUX PESTICIDES ET DE SUIVI SANITAIRE LIE A L'EXPOSITION AUX PESTICIDES DES PRODUCTEURS, 27 p.
 - Cissé, I., Aziz, A. Safétou, T., Fall, S.T., Hadji, E., Diop, S., 2003, Usage incontrôlé des pesticides en agriculture périurbaine : cas de la zone des Niayes au Sénégal, Cahier Agriculture, 12, p. 181-190.
 - Conrad, G. & Lappartient, J.R., 1987, Le 'continental terminal', sa place dans l'évolution géodynamique du bassin sénégalo-mauritanien durant le Cénozoïque, Journal of African Earth Sciences (1983) Vol. 6, Issue 1, p. 45-60,
[https://doi.org/10.1016/0899-5362\(87\)90106-0](https://doi.org/10.1016/0899-5362(87)90106-0).
 - Copernicus, 2021a, About Copernicus,
<https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus>.
 - Copernicus, 2021b, Download land cover data, Land cover classification gridded maps from 1992 to present derived from satellite observations,
<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/satellite-land-cover?tab=form>.
 - CSE, 2006, Étude de la dynamique des unités d'occupation- Utilisation des sols dans la zone d'intervention du projet d'appui à l'entrepreneuriat paysan (PAEP), Rapport de recherches 2006, p. 1-2.
 - Defourny, P., Lamarche, C., Bontemps, S., De Maet, T., Van Bogaert, E., Moreau, I., Brockmann, C., Boettcher, M., Kirches, G., Wevers, J., Santoro, M., 2017, Land Cover CCI PRODUCT USER GUIDE VERSION 2.0, CCI-LC-PUGV2, D3.03, Land Cover CCI, 105 p.
 - DGPPE (Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau), 2014, Étude du plan de gestion des ressources en eau de la sous UGP Niayes : Rapport provisoire, 80 p.

- DGPRES, 2020, Étude cartographique de la qualité de l'eau dans le bassin arachidier, R1. Rapport de démarrage et d'orientation méthodologique, réalisé par le Groupement AR-TELIA/IDEV/SHER pour le Ministère de l'eau et de l'assainissement dans le cadre du Projet Eau et Assainissement en Milieu Rural (PEAMIR), 167 p.
- Diop, A., 2013, Diagnostic des pratiques d'utilisation et quantification des pesticides dans la zone des Niayes de Dakar (Sénégal), Thèse de doctorat, 160 p.
- Diop, A., Diop, Y.M., Sarr, S.O., Ndiaye, B., Gueye, R., Thiam, K., Cazier, F., Delattre, F., 2019, Pesticide contamination of soil and groundwater in the vulnerable agricultural zone of the Niayes (Dakar, Senegal), Analytical Chemistry Letters, 9 :2, p. 168-181, DOI : [10.1080/22297928.2019.1613928](https://doi.org/10.1080/22297928.2019.1613928).
- Diop Thioune, P.B., Ndao, S., Diouf, M., Diallo, M.S., Diédhion, A., Diaw, E.H.B., 2011, Évaluation de la vulnérabilité de la nappe libre de la zone des Niayes (Sénégal) par les méthodes DRASTIC, SINTACS et Index de Susceptibilité (SI), International Journal of Innovation and Applied Studies ISSN 2028-9324 Vol. 26 No. 4 Jul. 2019, p. 965-984.
- Dollé, F., Thomas, C., Orban, Ph., Brouyère, S., 2004, D01 : Travail préparatoire au développement de l'outil SIG pour la cartographie de la vulnérabilité, Convention Région wallonne et HGE-ULG, Développement d'un module SIG de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines et de risques et application aux principales masses d'eau souterraine de Wallonie, 20 p.
- Ebener, S., 2000, Utilisation d'un SIG en mode raster pour la spatialisation du bilan hydrique à l'échelle mensuelle, Th. sc. Terre, Université de Genève ; Sc. 3127.
- ESA (The European Space Agency), 2021, Home, Technical Guides, Sentinel-2 MultiSpectral Instrument (MSI) Overview, <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/msi-instrument>.
- Fall, M., Fall, N., Hmeyade, B., Bacar, S., Travi, Y., 2017, Gestion intégrée et durable de systèmes aquifères et des bassins partagés de la région du Sahel, Rapport du projet régional de coopération technique appuyée par l'AIEA-RAF/7/011- Bassin Sénégal-Mauritanien, 53 p.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 2021, HWSD (Harmonized World Soil Database), FAO soils portal, Harmonized World Soil Database v 1.2, <http://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/>.
- FAO, 2012, ETo Calculator, Land and Water, <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/eto-calculator/en/>.
- FAO, 1974, Key to the FAO Soil Units (1974) Extract from "Legend of the Soil Map of the World", 1974, UNESCO, Paris, <http://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-classification/fao-legend/key-to-the-fao-soil-units/en/>.

- Faye, S., 2017, Cartographie de la vulnérabilité de la nappe des Niayes à l'intrusion saline : Évaluation - cartographie et orientations stratégiques pour une meilleure gestion, Rapport final de cartographie de la vulnérabilité et orientations stratégiques R2, dans le cadre du Programme d'aménagement et développement économique des Niayes (PADEN) pour la DGPRE, 86 p.
- Faye, S., Gaye, C.B., Taylor, R.G., Diaw, M.T., Pouye, A., 2019, Isotopic and geochemical evidence of anthropogenic recharge to the Thiaroye Urban aquifer of Dakar, Senegal, présentation pour International Symposium on Isotope Hydrology : Advancing the Understanding of Water Cycle Processes, 13 p.
- Flicoteaux, R., 1975, Sur l'attribution à l'Eocène moyen des couches calcaires et argilo-phosphatées de Pallo (Plateau de Thiès, Sénégal occidental). Bull. Soc. Géol Fr., 17, (3), p. 430-434.
- JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency), 2021, World MNT, <https://global.jaxa.jp/>
- Ibrahim, E., Barnabe, P., Ramanaidou, E. and Pirard, E., 2018, Mapping mineral chemistry of a lateritic outcrop in new Caledonia through generalized regression using Sentinel-2 and field reflectance spectra, International Journal of Applied Earth Observation and Geo-information, p. 73-653
- Mbaye, A., 1999, «Production des légumes à Dakar : importance, contraintes et potentialités,» chez Agriculture urbaine en Afrique de L'ouest, Ottawa, ed. O. Smith, International Development Research Centre, p. 56-66.
- Mindat, Darou Khoudoss mine, Kayar, <https://www.mindat.org/loc-157125.html>.
- Nachtergaele, F., Van Velthuizen, H., Verelst, L., Batjes, N., Dijkshoorn, K., Van Engelen, V., Fischer, G., Jones, A., Montanarella, L., Petri, M., Prieler, S., Teixeira, E., Wiberg, D., Shi, X., 2009, Harmonized World Soil Database, Version 1.1, 46 p.
- NASA, 2021, NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources, The POWER Project <https://power.larc.nasa.gov/beta/>.
- NASA, 2014, Observing in infrared, Earth Observatory, <https://earthobservatory.nasa.gov/features/FalseColor/page6.php>.
- Ndiaye, M., 2018, Initiative irrigation pour la zone des Niayes, Practica Foundation, 12min, https://www.youtube.com/watch?v=Re3Bq1YnG_A.
- Ndoye, S., Ndiaye, B., Diop, C., 2006. Analyse pédologique de la région de Niayes au Sénégal. JSPI 6, p. 45-55.
- Ngom, S., Seydou, T., Thiam, M.B., Anastasie, M., 2012, Contamination des produits agricoles et de la nappe phréatique par les pesticides dans la zone des Niayes au Sénégal, Rev. Sci. Technol., Synthèse 25, p. 119-130.

- Noël, B.J., Barusseau, J.P., Roger J., Dabo, B., Diagne E., Duvail, C., Nehlig, P., Sagna, R., Sarr, R., Serrano, O., Lignon, G., Seck, D., 2009, Carte géologique du Sénégal à 1/ 500 000, Feuille Nord-Ouest, Geoter SAS pour le compte du Ministère des Mines, de l'industrie et des PME avec le soutien financier de l'Union européenne.

- Pirard, E., 2020, Cours de "Geological imaging" donné à l'Université de Liège.

- Popescu, I.C., Dachy, M., Brouyère, S., Dassargues, A., 2004, Test d'une méthode de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque applicable aux nappes aquifères de la Région Wallonne - Application à l'aquifère calcaire du Néblon -Rapport final, Convention RW-ULG, GeomaC (Hydrogéologie), 155 p.

- Popescu, I.C., Brouyère, S., Dassargues, A., 2019, The APSÛ method for process-based groundwater vulnerability assessment, Hydrogeology journal, Springer, 17 p.
DOI : <https://doi.org/10.1007/s10040-019-02013-z>

- Roger, J., Nehlig, P., Serrano, O., Barusseau, J.P., Duvail, C., Noël, B.J., Sarr, R., revue de la carte géologique du Sénégal à 1/500 000 financé par le Sénégal et l'Union européenne et réalisé par le BRGM et GEOTER,
<https://geosen.org/?p=ressources&page=geologie1>

- Rutledge, K., Ramroop, T., Boudreau, D., McDaniel, M. Teng, S., Sprout, E., Costa, H., Hall, H., Hunt, J., 2011, Upwelling, Resource Library, Encyclopedic Entry, National Geography,
<https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/upwelling/>

- Sall, M., Vanclooster, M., 2009, Assessing the well water pollution problem by nitrates in the small scale farming systems of the Niayes region, Senegal, Agricultural Water Management Vol. 96, Num. 19, p. 1360-1368.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.04.010>.

- Sentinel, 2021, Mission Sentinel-2, ESA European Space Agency,
<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>.

- Simler, R., 2021, Logiciel Diagrammes, Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon,
<http://www.lha.univ-avignon.fr/LHA-Logiciels.htm>.

- Thomas, C., Orban, Ph., Dassargues, A., Brouyère, S., 2004, D03 : : Description des applications réalisées et cartes de vulnérabilité produites avec l'outil SIG, Convention Région wallonne et HGE-ULG, Développement d'un module SIG de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines et de risques et application aux principales masses d'eau souterraine de Wallonie, 101 p.

- USDA (United States of Agriculture), 1987, Soil Mechanics, Level I, Module 3, USDA Textural Classification, study guide, 53 p.

- Vuilleumier, J., 2021, Latérites, Enciclopedia Universalis,
<https://www.universalis.fr/encyclopedia/laterite/>.

- WWO (World Weather Online), 2021, World Weather Online, Mboro Monthly Climate Averages, Thies, SN,
<https://www.worldweatheronline.com/mboro-weather-averages/thies/sn.aspx>.

5.2 Annexes

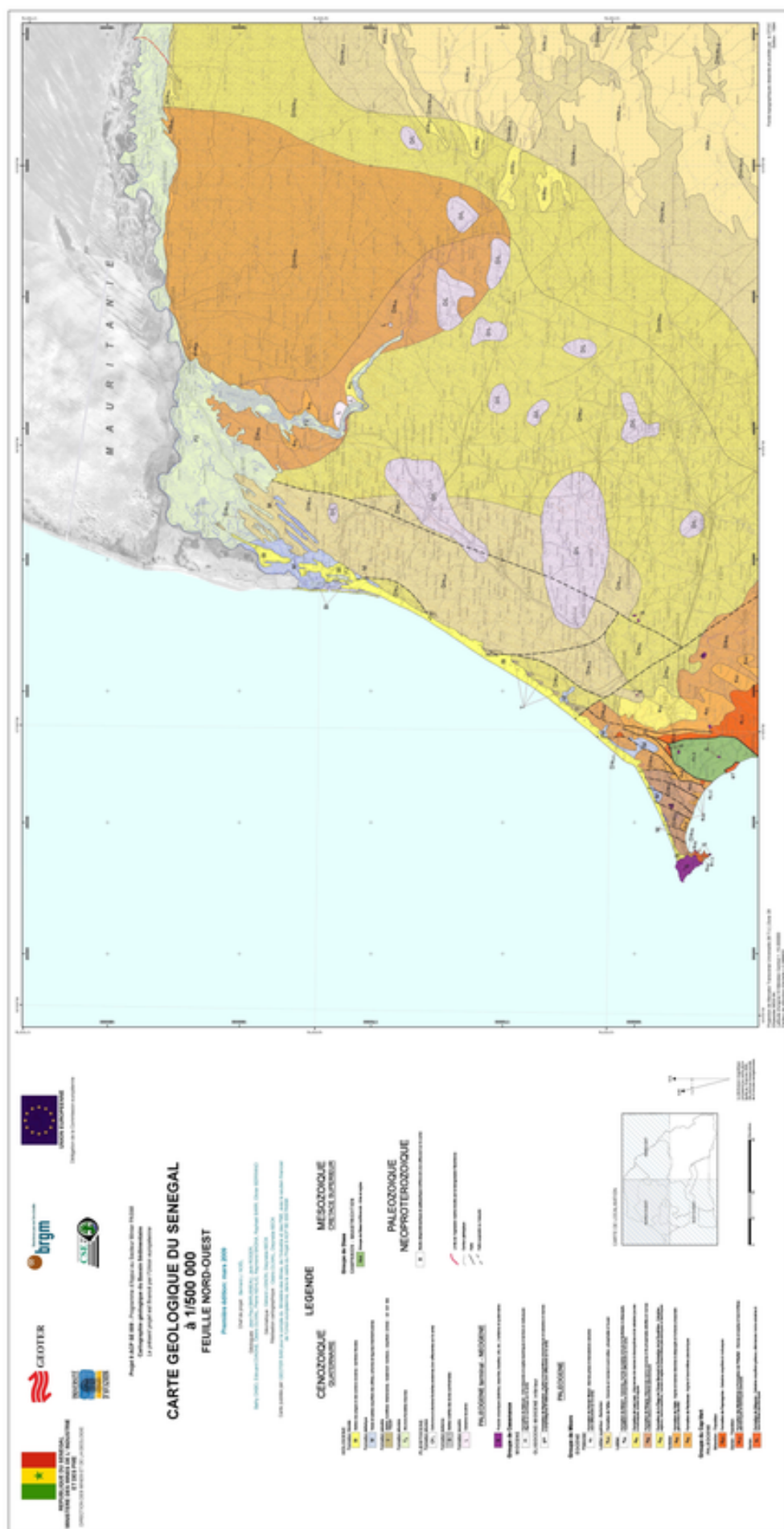


FIGURE 5.1 – Carte géologique du Sénégal à 1/500 000 (Noël et al., 2009)

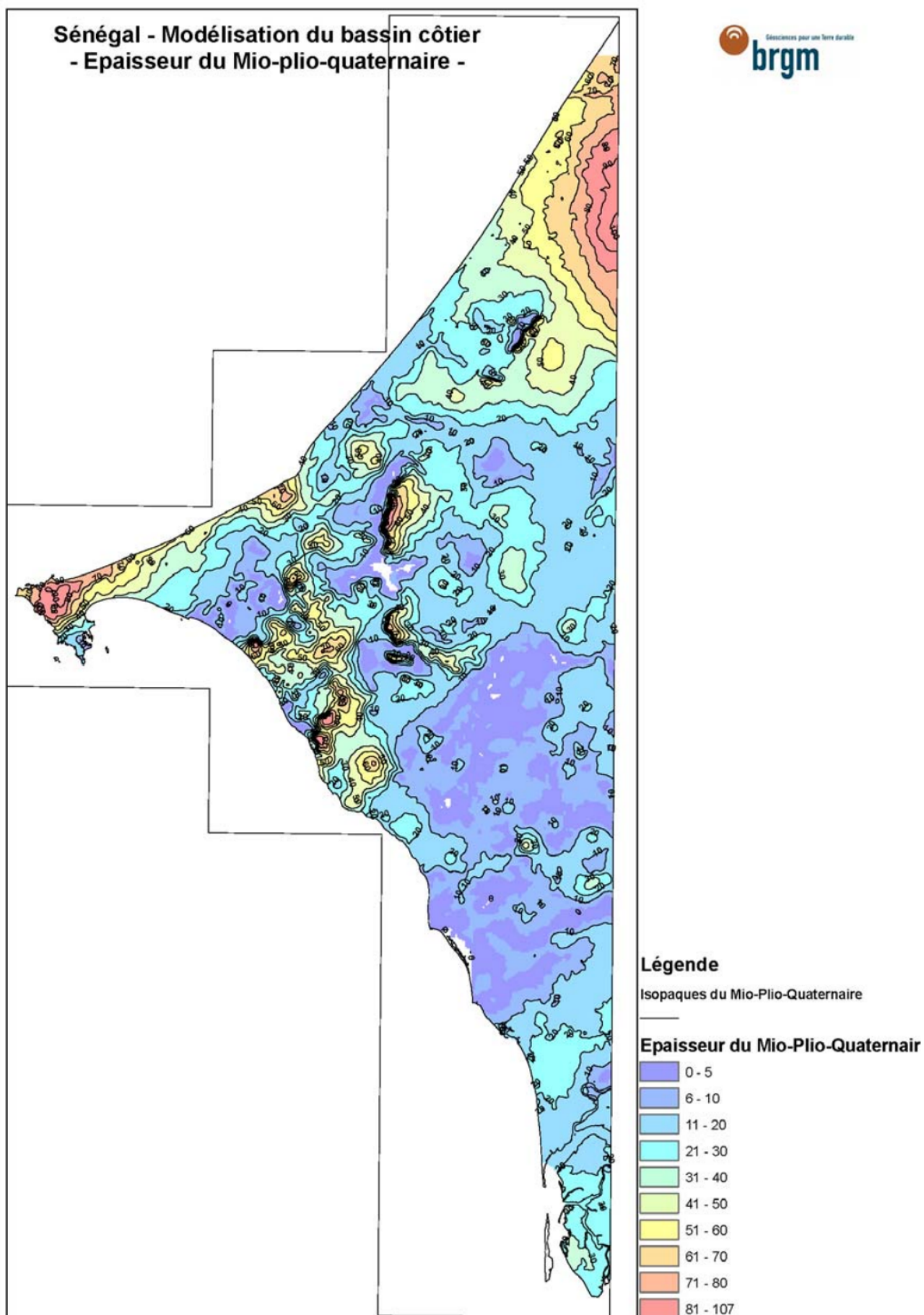


FIGURE 5.2 – Carte en isopaques du Mio-Plio-Quaternaire (Roger et al., 2009)

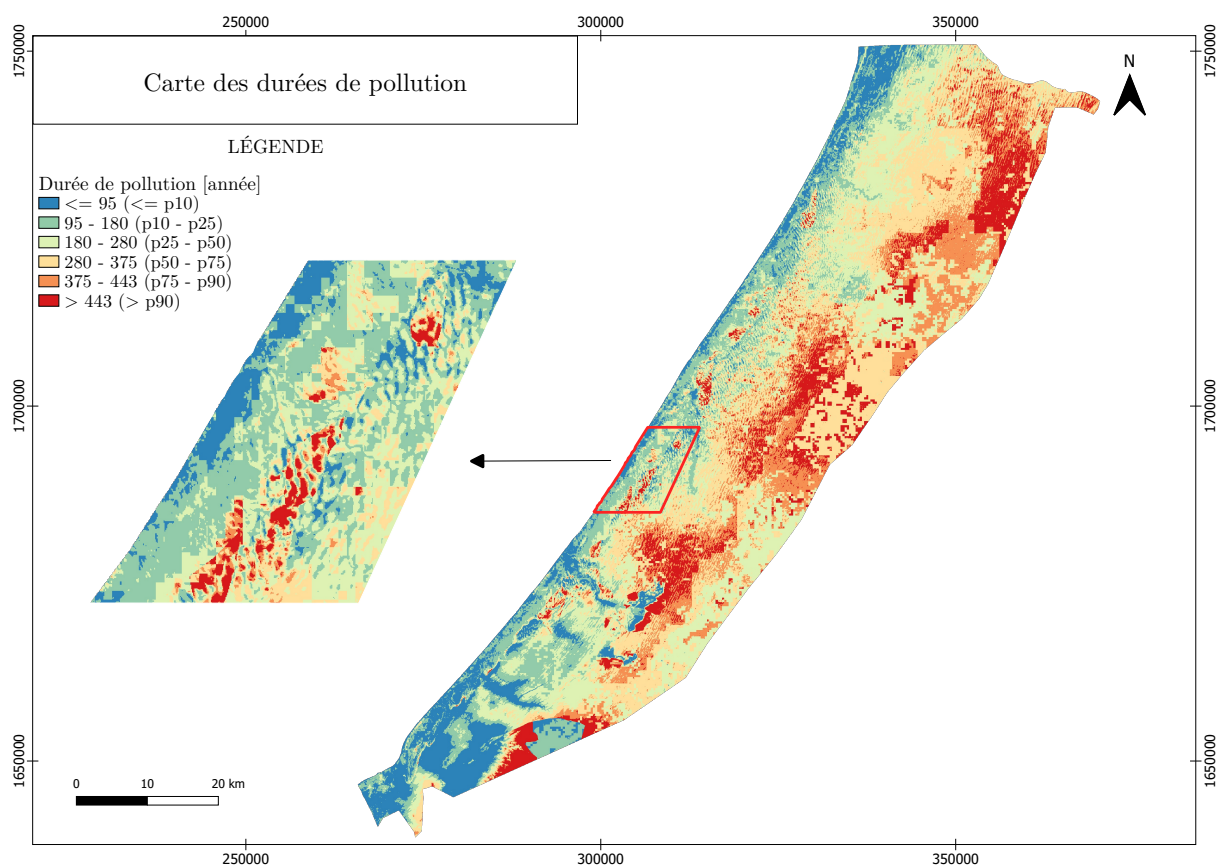


FIGURE 5.3 – Carte des durées de pollution

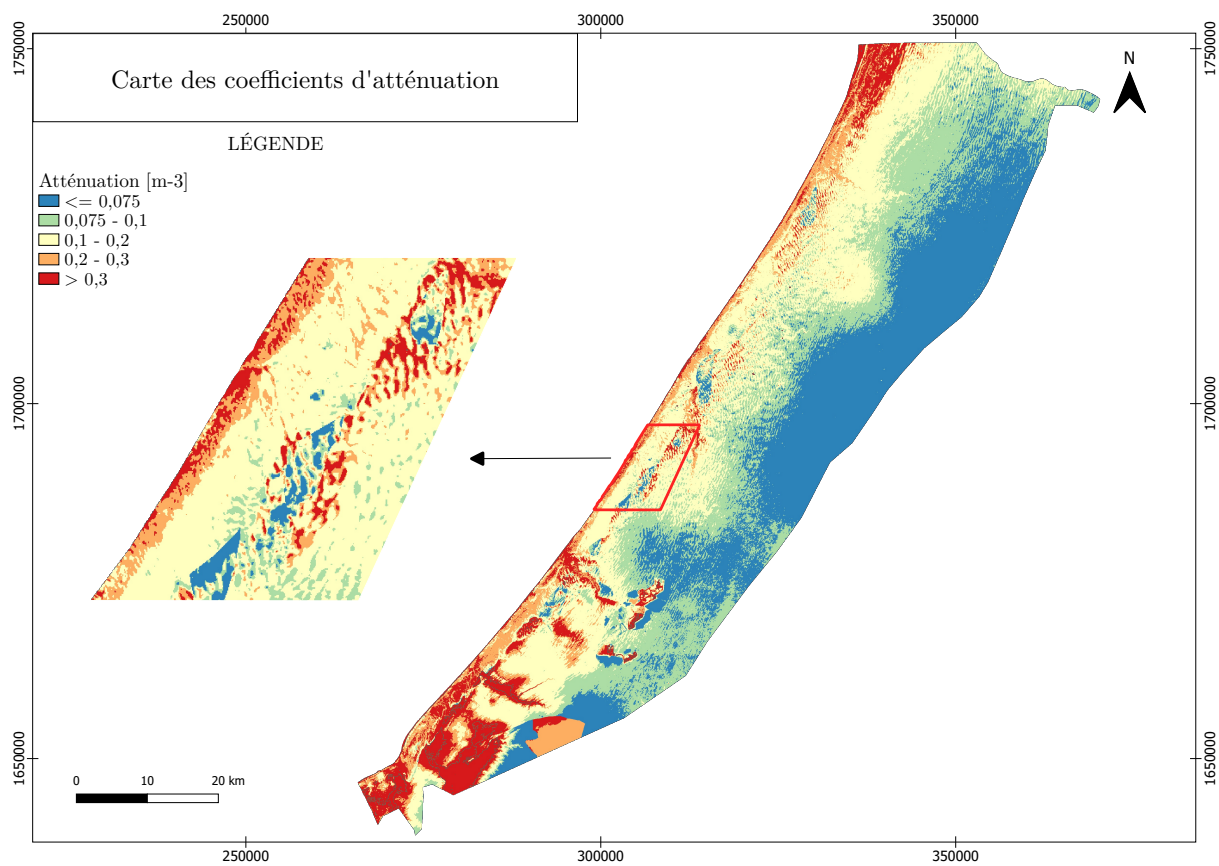


FIGURE 5.4 – Carte des coefficients d'atténuation

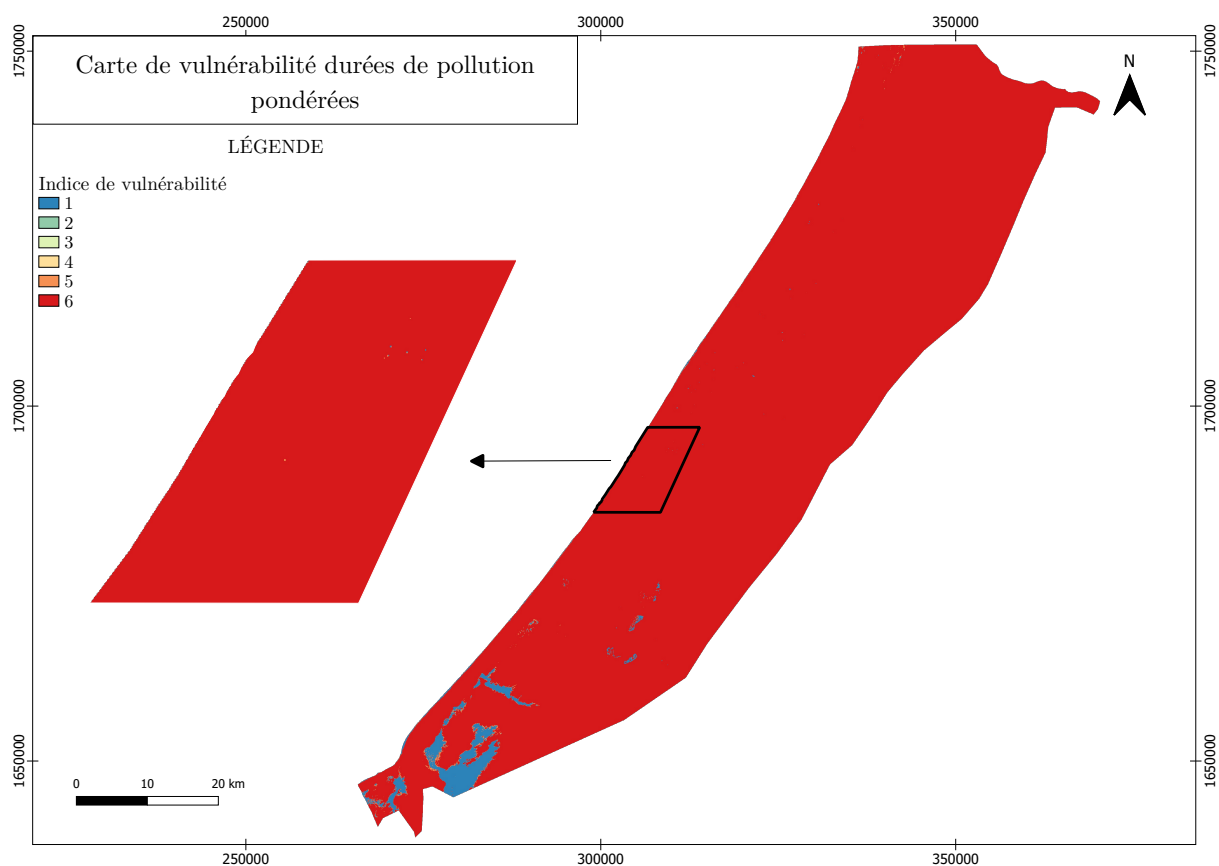


FIGURE 5.5 – Carte de vulnérabilité durées de pollution pondérées

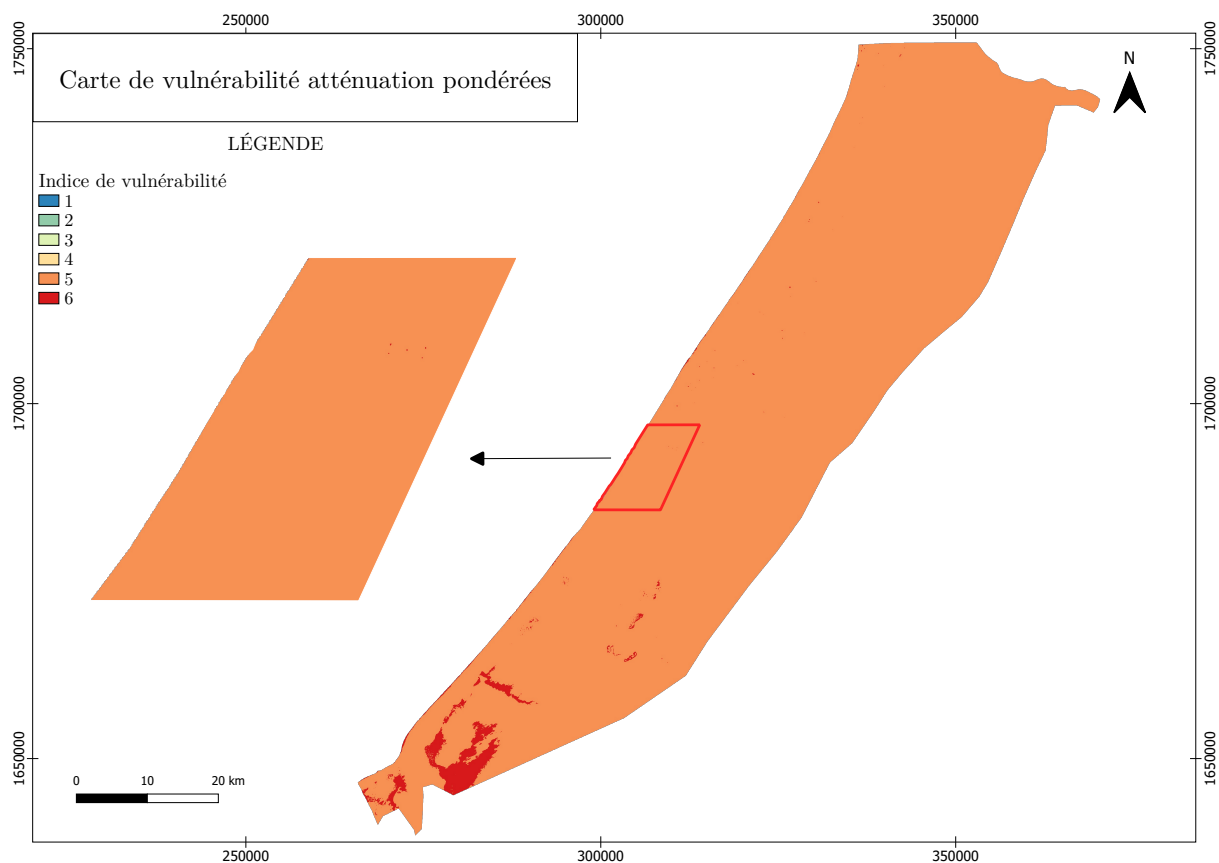


FIGURE 5.6 – Carte de vulnérabilité atténuation pondérées

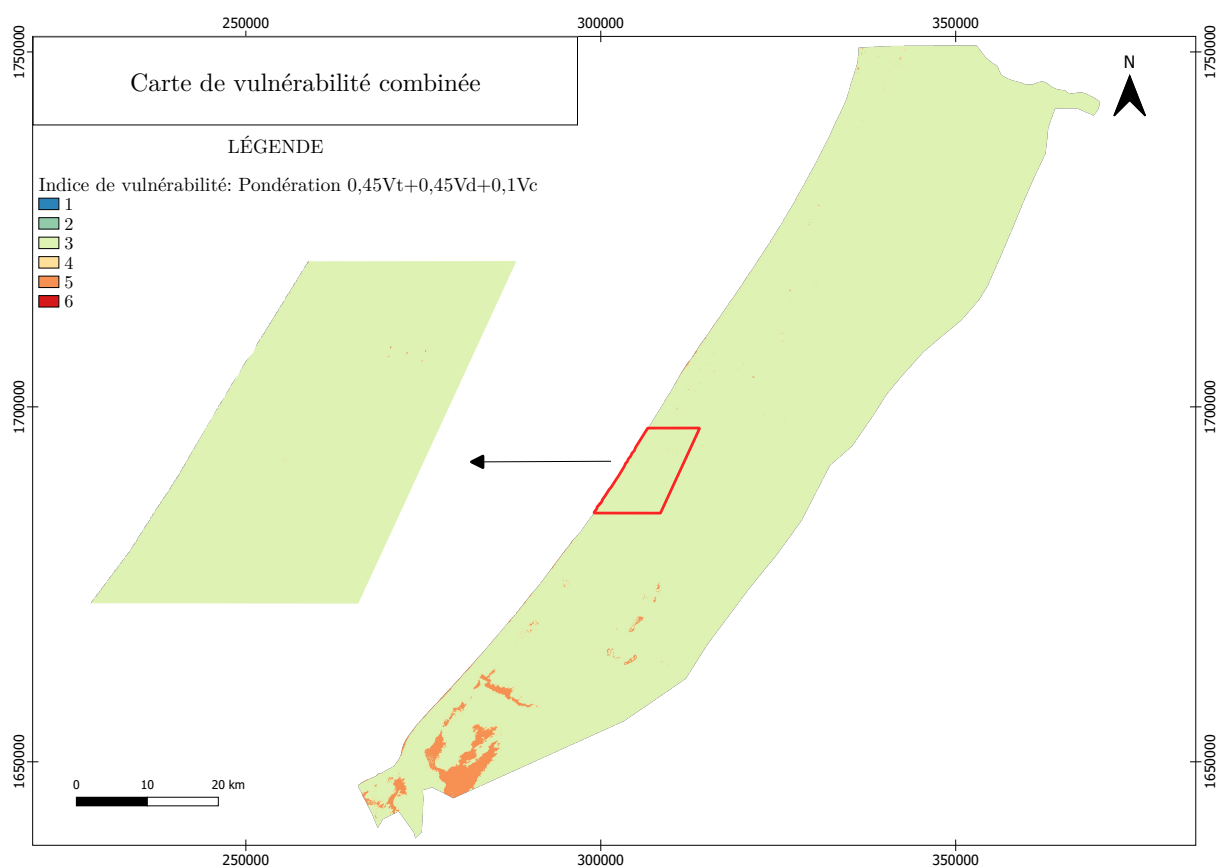


FIGURE 5.7 – Carte de vulnérabilité combinée