



Exploitation de la base de données sur les Corridors Fluviaux du district Seine-Normandie

**Automatisation du calcul d'indices de fonctionnalités et approche
de leur validation**

Nader Abdou Dagga, Stéphan Gaillard, Hocine Bendjoudi et Gilles Billen

Avril 2006

Mai 2006 Etude réalisée pour le compte de l'AESN (lettre de commande n° 0597 037)

1. Résumé

Dans le cadre des travaux de mise en œuvre de la DCE, l'Agence de l'Eau Seine Normandie a souhaité identifier les secteurs les plus efficaces vis-à-vis de la rétention des nitrates, et d'expansion des crues de manière à définir des actions de protection ou de restauration sur ces sites « efficaces » et cela en relation étroite avec les acteurs locaux. Le PIREN-Seine, a proposé une méthode, relative à l'inventaire typologique des zones humides riveraines, basée sur l'analyse de leurs caractéristiques hydro-géomorphologiques S. Gaillard et al. (2001). La méthode développée repose sur 1) l'inventaire et la classification des zones humides riveraines en fonction de leur structure hydro-géomorphologique 2) la sélection d'indicateurs et la définition d'indices permettant d'évaluer les fonctions des zones humides (rétention des nitrates et des crues...). 3) développement d'applications permettant d'aboutir à une caractérisation fonctionnelle des corridors fluviaux dans le bassin Seine-Normandie

Ainsi, une base de données hydro-géomorphologique des corridors fluviaux dans le bassin Seine-Normandie a été réalisée. Elle renseigne par tronçons de 250 m de longueur (Unité Spatiale Élémentaire) une série de caractéristiques morphologiques, pédologiques et géologiques pertinentes par rapport aux fonctionnalités des zones humides riveraines. Cette base a été complétée par d'autres informations déjà disponibles sur le bassin de la Seine, et offre pour la première fois la possibilité de procéder à un inventaire exhaustif à l'échelle du bassin de la Seine des corridors fluviaux les plus actifs en terme de régulation des crues et de rétention des polluants.

Pour mettre en valeur la base de données hydro-géomorphologiques constituée, une méthodologie a été élaborée pour définir des indices fonctionnels caractérisant la fonction des crues et de la rétention des nitrates. La méthode employée est basée principalement sur des analyses spatiales par Systèmes d'Information Géographique (SIG). Ce travail a été effectué dans le cadre d'un stage proposé par l'Agence de l'Eau Seine Normandie et suivi par l'Université Pierre et Marie Curie et notamment l'UMR Sisyphe E. Joyeux, pour son Master de l'Université de Lyon 2. En agrégeant les caractéristiques des corridors fluviaux jugées a priori les plus importantes pour les fonctions de régulation hydrique et de rétention des polluants, elle a défini deux indicateurs de potentialité pour ces deux fonctions. La cartographie à l'échelle du bassin de la Seine de ces indices permet de localiser les zones humides riveraines *a priori* les plus efficaces vis-à-vis des 2 fonctions considérées. Chaque fonction est calculée à partir des 11 indicateurs suivants : le type de nappe, la sinuosité des corridors, la pente maximale dans le sous bassin, le type de végétation, la présence des gravières, la densité des obstacles, la densité des barrages, la densité des connexions secondaires, la largeur de la pleine alluviale, sa morphologie et en fin le type de revêtement de la pleine alluviale.

Le présent travail s'est servi des mêmes indicateurs définis par E. Joyeux (2005). Mais le principal apport consiste à l'amélioration des calculs d'indices et la modification du codage des indicateurs, l'automatisation des calculs et la proposition d'une approche de validation. Ainsi, Les principales étapes de ce travail sont :

- 1- L'amélioration du codage des indicateurs, définis par E. Joyeux, en introduisant des facteurs de pondération pour mieux représenter l'information géographique.

- 2- L'élaboration d'un outil automatique d'extraction d'indicateur et de calcul d'indices à partir des données de la base 'Corridors Fluviaux'.
- 3- L'application à l'établissement de la typologie géomorphologique de Stéphan Gaillard.
- 4- La tentative de validation des indices par confrontation à la mesure directe des fonctions dans un certain nombre de situations documentées.

La réalisation de ces étapes a permis d'une manière globale, une meilleure valorisation des bases de données des zones humides riveraines à l'échelle du district Seine-Normandie. Cette valorisation est assurée grâce aux nouveaux résultats obtenus que sont :

Elaboration d'une interface pour l'automatisation des calculs d'indice

Une interface a été élaborée, qui permet d'interroger cette base et de construire des indices synthétiques pondérant les différents indicateurs intervenant dans les fonctionnalités des zones humides riveraines, de calculer ces indices dans un territoire donné, et d'en fournir une représentation cartographique et une analyse statistique.

Des modifications ont été proposées pour la définition des indicateurs et le calcul des indices. Certaines de ces modifications peuvent affecter considérablement l'indice résultant, de sorte à donner une flexibilité de calcul d'indice et une possibilité d'expertise afin de corriger localement les valeurs des indices.

Etablissement de la typologie géomorphologique

La base a été utilisée par ailleurs pour établir, sur l'ensemble du district Seine-Normandie, une typologie géomorphologique rendant compte des conditions de mise en place du remplissage alluvionnaire des corridors fluviaux, qui déterminent nombre des fonctionnalités actuelles de ces corridors.

Evaluation directe des fonctionnalités des zones humides riveraines

Un important travail a été réalisé pour évaluer l'importance quantitative de la rétention des nitrates effectuée par les corridors fluviaux à l'échelle du district Seine-Normandie. Très variable (de 4 à 98%) selon les secteurs, cette rétention s'élève cependant en moyenne à 58% en conditions estivales. L'estimation directe de la fonction de rétention hydraulique est moins avancée, mais confirme le rôle bénéfique des zones humides riveraines en terme de régulation des crues.

Validation des indices et de la typologie géomorphologique

La comparaison des estimations de rétention des nitrates, là où elle est possible (c'est à dire sur env. 150 ensembles de corridors) avec les indices définis a priori sur tous les indicateurs disponibles ou avec la typologie géomorphologique, en vue d'une validation de ces indices ou de cette typologie est relativement décevante, la variabilité des estimations de rétention ne pouvant être tout entière expliquée par les indicateurs retenus.

On retiendra cependant les conclusions suivantes :

- Parmi les classes de la typologie géomorphologique, les types emboîtés et superposés, mais également les types incisés avec revêtement holocène, très représentés dans les têtes de bassin, sont les plus efficaces en terme de rétention des nitrates. Les types

stables et incisés dans la roche en place sans revêtement alluvionnaire sont beaucoup moins efficaces.

- Parmi les indicateurs disponibles dans la base de données générale, cinq semblent significatifs en terme de pouvoir de rétention des nitrates: La présence de chenaux secondaires, de gravières en eau, la nature du revêtement alluvionnaire, la largeur du corridor fluvial, le type de végétation.

Dans l'état actuel de ces travaux, il est difficile d'assurer la pertinence des cartes d'indices pour l'évaluation des fonctionnalités des zones humides riveraines du district Seine-Normandie. Ce pendant, ce travail constitue le premier résultat de l'exploitation des bases hydro-géomorphologique et qui peut être amélioré par l'intégration de nouvelles données de validation ou encore par l'intégration d'autres sources de données tel que les cartes de télédétection. Ainsi, ces cartes sont insuffisantes, à elles seules, pour identifier à coup sûr les secteurs où des actions de protection ou d'aménagement pourraient être les plus efficaces. Ce pendant, les résultats obtenus peuvent être considérés comme exploratoires et peuvent servir comme bases pour de nouvelles applications dans la même problématique.

Table des matières

1. Introduction	3
2. Elaboration d'un applicatif d'extraction d'indicateurs, de construction d'indices et de cartographie	5
2.1. Rappel de la structure de la base de données 'Corridors Fluviaux'	6
2.2. Procédure de calcul des indices	7
2.3 Codage et calcul des Indicateurs	8
2.4. Calcul de l'indice	16
2.5. Conception de l'interface	21
3. Caractérisation géomorphologique des zones humides riveraines	24
3.1. Classification théorique des zones humides riveraines	24
3.2. Application de la typologie aux corridors fluviaux de Seine Normandie	27
4. Tentative de validation des indices fonctionnels	30
4.1. Fonction de rétention des nitrates	31
4.2. Fonction d'écrêtement des crues	33
5. Conclusions	43
Annexe : Notice d'utilisation de l'applicatif	47

2. Introduction

Il est démontré aujourd'hui que les zones humides riveraines des cours d'eau peuvent contribuer au bon état écologique des masses d'eau par leurs fonctions multiples d'épuration des eaux, de rétention de crues, de réservoirs de biodiversité. L'importance de ces fonctions varie cependant largement selon les secteurs en fonction de nombreuses caractéristiques de nature morphologique, géologique, hydrologique ou liée à leur aménagement par l'homme.

C'est pour cette raison, que l'Agence de l'Eau Seine Normandie, dans le cadre des travaux de mise en œuvre de la DCE, a souhaité identifier les secteurs les plus efficaces ou stratégiques vis-à-vis de la rétention des nitrates, et d'expansion des crues de manière à définir des actions de protection ou de restauration sur ces sites « efficaces » et cela en relation étroite avec les acteurs locaux.

Dans le cadre du PIREN-Seine, S. Gaillard et al. (2001) a proposé une méthode relative à l'inventaire typologique des zones humides riveraines basée sur l'analyse de leurs caractéristiques hydro-géomorphologiques.

La méthode développée repose sur trois étapes :

- **La première étape** consiste à inventorier et classer les zones humides riveraines en fonction de leur structure hydro-géomorphologique en considérant les différentes échelles spatio-temporelles du fonctionnement des hydrosystèmes. Cette étape, finalisée sous la forme d'une typologie couplée à un Système d'Information Géographique (SIG), s'appuie sur la constitution d'une base de données hydro-géomorphologiques à l'échelle du bassin Seine-Normandie.
- **La deuxième étape** a pour objet la sélection d'indicateurs et la définition d'indices permettant d'évaluer les fonctions des zones humides (rétention des nitrates et des crues...) pour chaque type hydro-géomorphologique, en terme de présence/absence et d'intensité.
- **La troisième étape correspond au développement d'applications permettant d'aboutir à une caractérisation fonctionnelle des corridors fluviaux dans le bassin Seine-Normandie** (analyses spatiales, système expert, etc...) en fonction des types hydro-géomorphologiques, et de caractériser l'importance de la fonctionnalité.

Lancée par l'Agence de l'Eau, **la constitution de la base de données hydro-géomorphologiques des corridors fluviaux dans le bassin Seine-Normandie (étape 1** de la méthodologie présentée ci-dessus) a été réalisée (septembre 2003 à septembre 2005) par le bureau d'études SCOT, associé à GEOSPHAIR. Pour ce vaste chantier, l'Agence de l'Eau s'est appuyée sur une assistance à maîtrise d'ouvrage composée de S. Gaillard, H. Bendjoudi et D. Brunstein.

Cette base renseigne par tronçons de 250 m de longueur (Unité Spatiale Élémentaire) une série de caractéristiques morphologiques, pédologiques et géologiques pertinentes par rapport aux fonctionnalités des zones humides riveraines.

Cette base de données, complétée par d'autres informations déjà disponibles sur le bassin de la Seine, offre pour la première fois la possibilité de procéder à un inventaire exhaustif à

l'échelle du bassin de la Seine des corridors fluviaux les plus actifs en terme de régulation des crues et de rétention des polluants.

La définition des indices fonctionnels et le développement SIG correspondant respectivement à l'étape 2 et 3 de la méthode ont été effectués dans le cadre d'un stage proposé par l'Agence de l'Eau Seine Normandie et suivi par l'Université Pierre et Marie Curie et notamment l'UMR Sisyphe II s'est déroulé du 1^{er} avril au 23 septembre 2005, a été réalisé par E. Joyeux, pour son Master de l'Université de Lyon 2.

En agrégeant les caractéristiques des corridors fluviaux jugées a priori les plus importantes pour les fonctions de régulation hydrique et de rétention des polluants, elle a défini deux indicateurs de potentialité pour ces deux fonctions. La cartographie à l'échelle du bassin de la Seine de ces indices permet de localiser les zones humides riveraines *a priori* les plus efficaces vis-à-vis des 2 fonctions considérées.

A ce stade des résultats, il est apparu indispensable d'entreprendre une validation des premiers travaux réalisés. Il correspond aux trois étapes suivantes :

1. Elaboration d'un outil logiciel d'extraction d'indicateur et de calcul d'indices à partir des données de la base 'Corridors Fluviaux'
2. Application à l'établissement de la typologie géomorphologique de Stéphan Gaillard.
3. Approche de validation par confrontation à la mesure directe des fonctions dans un certain nombre de situations documentées.

Les résultats de ces étapes ont fait l'objet du présent rapport (Figure I.1).

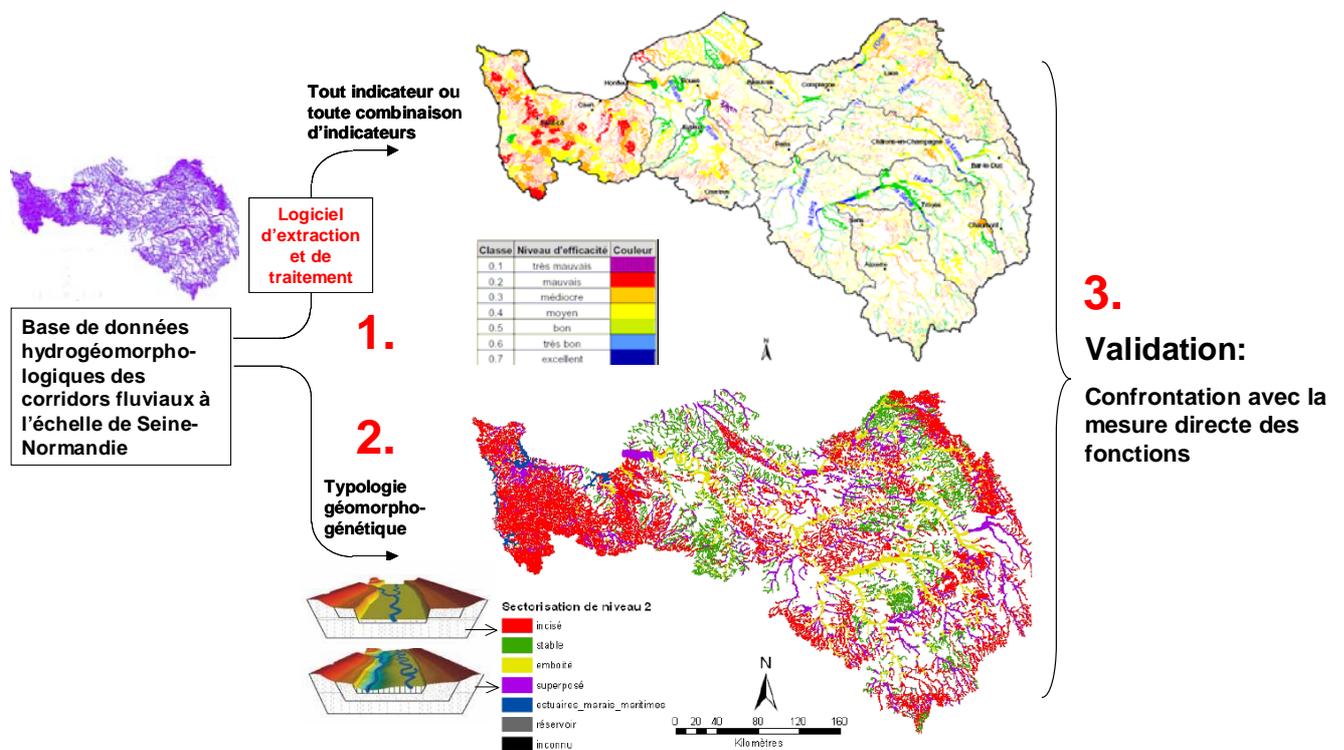


Figure I.1 : Les 3 étapes de la présente étude :

Il convenait tout d'abord d'implémenter ces méthodes sous SIG afin d'automatiser les calculs. En effet, les échelles possibles de calculs d'indices (bassin versant élémentaires, masses d'eau, découpages administratifs, etc.) rendent nécessaire une automatisation complète du processus de calcul. De même, les évolutions possibles de la formule de calcul des indices impliquent de pouvoir tester différentes hypothèses de combinaison des facteurs. Chaque nouvelle formule doit pouvoir être testée rapidement, ce que seul un traitement entièrement automatisé peut permettre.

C'est le premier objectif de la présente étude, que d'élaborer un **applicatif convivial** permettant d'extraire de la base de données des corridors fluviaux du district Seine Normandie tout indicateur, ou combinaison d'indicateurs, pour en construire des indices de fonctionnalité. Il s'agit donc de développer une interface flexible qui assure, à la fois, un calcul automatique des critères et des indices, et propose une meilleure représentation cartographique des résultats.

Une application particulière de cette procédure consiste à établir, à partir des informations de la base, la **typologie hydro-géomorphologique** des corridors fluviaux définie par S. Gaillard, car cette typologie est en elle-même porteuse d'indications pertinentes sur les fonctionnalités des zones humides riveraines.

Enfin, ces étapes méthodologiques étant réalisées, il restera à les mettre en œuvre pour tenter de **valider ou de redéfinir** différents indices typologiques par comparaison avec la mesure directe de la fonction étudiée dans un certain nombre de situations correctement documentées.

3. Etape d'élaboration d'applicatif d'extraction d'indicateurs, de construction d'indices et de cartographie

2.1. Rappel de la structure de la base de données 'Corridors Fluviaux'

La Base de Données Corridor Fluviaux couvre l'ensemble du district Seine-Normandie, découpé en 51 masses d'eau souterraines affleurantes et 12629 sous bassins versants élémentaires (BVE). Les couloirs fluviaux ont été segmentés en Unités Spatiales Élémentaires (USE) représentant des tronçons de 250 m de long.

La base est constituée de 213913 éléments comportant chacun 23 champs renseignés.

7 bases de données géographiques ont été exploitées pour la définition de ces champs. Ces bases sont les suivantes :

2.1.1. La base de données hydrogéomorphologiques

Cette base a permis de définir l'unité de travail, le corridor fluvial. La description géomorphologique des USE qu'elle contient va maintenant permettre de renseigner plusieurs indicateurs : la sinuosité et la densité des chenaux secondaires, ainsi que leur connexion au chenal principal (couche Carthage), la largeur de la plaine alluviale, la morphologie (sub-horizontale, à dépressions et levées, à dépressions et montilles) et le revêtement du sol (minérale, mixte, organique).

2.1.2. La base de données des masses d'eau (AESN)

La base de données des masses d'eau est issue de l'Etat des Lieux du Bassin de la Seine et des Cours d'Eau Côtiers Normands, élaboré en novembre 2004 par l'AESN dans le cadre de la DCE. Elle contient la délimitation des masses d'eau souterraines en fonction de l'étage géologique (jurassique, crétacé, tertiaire, alluvionnaire) et un descriptif de chacune d'entre elles (code, nom, type de masses d'eau, surface, lithostratigraphie, risque...). On dispose aussi des masses d'eau superficielles avec la description de leur degré de modification et du risque de non atteinte du bon état écologique.

2.1.3. La base de données CORINE Land Cover (IFEN/EEA)

Cette base de données est issue d'un programme européen qui a pour objet de fournir une information géographique homogène de l'occupation du sol. Cette base, au 1/100 000, est gérée par l'IFEN. Cet inventaire se caractérise par des choix techniques spécifiques : méthodologie de photo-interprétation d'images satellitaires assistée par ordinateur, seuil minimal des unités cartographiées de 25 hectares et nomenclature standard hiérarchisée sur 3 niveaux et 44 postes répartis selon 5 grands types d'occupation du territoire.

Cette base permet de renseigner les types de végétation (postes 2, 31, 32, 41 et 42) et la présence de gravières et plans d'eau (postes 131 et 512).

2.1.4. La base de données Carto

La BD Carto est une base de données cartographiques de référence. Elle est utilisée de l'échelle départementale (1/50 000) à l'échelle régionale (1/250 000). Elle contient les couches "Réseau routier et franchissements", "Réseau ferré", "Hydrographie", "Unités administratives", "Habillage", "Toponymes" et "Equipements". Les deux premières couches seront utilisées dans cette étude pour renseigner l'indicateur relatif aux obstacles (routes et voies ferrées en remblai).

2.1.5. Le Modèle Numérique de Terrain (AESN)

Un MNT est une matrice de pixels géoréférencée indiquant une altitude. Sa résolution est de 100 m de côté. Il permet de renseigner la pente maximale des corridors.

2.1.6. La base de données des barrages et des écluses (AESN)

Cette base de données permet de localiser et donc de renseigner l'indicateur relatif aux barrages et aux écluses à l'échelle du bassin Seine-Normandie.

2.2. Procédure de calcul des indices

A la fois pour les besoins de l'automatisation et pour assurer une meilleure représentativité des résultats, certains choix méthodologiques ont été faits pour la constitution des corridors fluviaux et pour le calcul des indicateurs, qui diffèrent de ceux retenus par Edith Joyeux, La principale différence réside dans le fait que nous avons pondéré l'information en fonction de l'importance de la surface qu'elle représente au sein d'un corridor fluvial. Nous rappelons donc ici les choix méthodologiques dans la procédure de calcul des indicateurs et des indices.

2.2.1. Constitution des corridors fluviaux

L'échelle retenue pour élaborer la typologie fonctionnelle étant le sous bassin versant élémentaire, l'information, disponible à la base à l'échelle de USE, sera rapportée au niveau des corridors fluviaux. Chaque corridor est constitué d'un regroupement géographique de toutes les USEs appartenant à un même sous bassin élémentaire.

La méthode, de constitution des corridors fluviaux, rejoint celle définie par E. Joyeux, mais le calcul des champs diverge sur deux points. D'une part, les corridors se trouvant à cheval entre deux sous bassins élémentaires sont divisés selon la répartition de ces sous bassins élémentaires ; d'autre part, le calcul des moyennes des champs est pondéré par la surface de chaque USE.

Cette pondération, dans les calculs des champs des corridors, permet de donner l'information selon sa représentativité dans les corridors. L'exemple du calcul de la largeur d'un corridor est illustratif. La figure 2.1. montre un corridor formé d'USE de largeurs très différentes. Selon que le calcul de la moyenne utilise ou non une pondération par les surfaces propres de chaque USE, on obtient une valeur sensiblement différente, la moyenne pondérée étant plus représentative :

Largeur moyenne simple = $\sum (\text{largeur}_{\text{USE}}) / \text{nb}_{\text{USE}} = 645 \text{ m}$

Largeur moyenne pondérée = $\sum (\text{largeur}_{\text{USE}} * \text{surface}_{\text{USE}}) / \sum (\text{surfaces}_{\text{USE}}) = 771 \text{ m}$

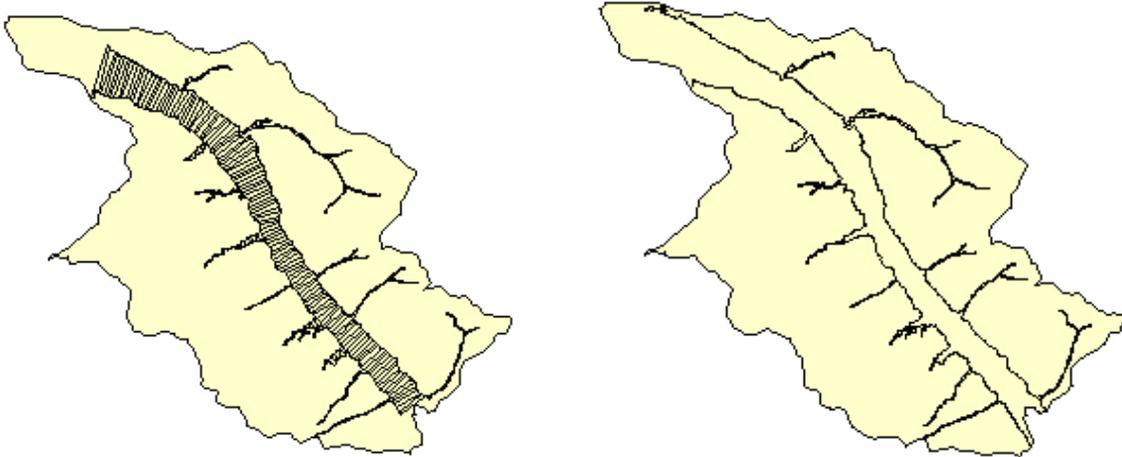


Figure 2.1. Exemple de corridor fluvial composé d'USE de largeurs très différentes

De la même manière, le champ relatif aux types de revêtement est calculé à partir des USEs, et rapporté au corridor, selon l'importante surfacique de chaque type de revêtement. Ainsi, pour chaque corridor, les champs surface_objets (10, 11, 12, 13) sont calculés selon la règle suivante :

$$\text{Surface SURF_OBJ}_{\text{Corridor}} = \sum (\text{SURF_OBJ}_{\text{USE}} * \text{surface}_{\text{USE}}) / \sum (\text{Surface}_{\text{USE}})$$

La même méthode est employée pour le calcul des champs définissant le type de morphologie, Morpho (10, 11,12) :

$$\text{Surface Morpho}_{\text{Corridor}} = \sum (\text{Morpho}_{\text{USE}} * \text{surface}_{\text{USE}}) / \sum (\text{Surface}_{\text{USE}})$$

2.3. Révision du codage retenu par E. Joyeux et calcul des Indicateurs

Dans le travail d'Edith Joyeux, les indicateurs renseignant les corridors fluviaux ont été codés en valeurs segmentées, "0.1", "0.5" et "0.9", selon la capacité des corridors à réaliser ou non les fonctions :

- Le code 0.1 : faible capacité de réalisation,
- Le code 0.5 : capacité moyenne,
- Le code 0.9 : capacité forte.

Les codes attribués sont donc qualitatifs, et ne permettent pas une appréciation de la variabilité de l'information à l'intérieur des corridors, la note majoritaire des USE étant attribuée à l'ensemble du corridor. Pour les indicateurs quantitatifs, tel que la pente et la largeur de la pleine alluviale, la décision de coder en trois valeurs n'est pas nécessairement utile, car le seuillage de cet indicateur entraîne une perte d'information. Pour répondre à ce problème, nous avons proposé dans le présent travail, deux solutions de codages : la normalisation pour les indicateurs quantitatifs calculés géométriquement et la pondération par les surfaces pour les indicateurs qualitatifs.

Pour les données quantitatives tel que la pente la largeur de la pleine : au lieu de coder les valeurs, nous avons décidé de les normaliser entre la valeur 0 et 1. Cela permet d'avoir un codage continu et une représentativité, de l'information, plus proche de la réalité.

Pour les données qualitatives (type de nappes, type de végétation...) : nous avons remplacé le codage en seuil par une pondération des codes par les surfaces des USEs qui compose un corridor. Cela permet une meilleure représentation de l'information et donne, en même temps, un effet de normalisation. Les valeurs des indicateurs ne seront donc pas en valeurs segmentées de 0.1, 0.5 et 0.9 mais en valeurs continues dans un intervalle [0,1].

Ces deux principes ont été appliqués aux calculs des indicateurs. Nous les examinons ci-dessous un par un en présentant les calculs et les codages des indicateurs que nous avons proposés, en comparaison avec ceux réalisés par E. Joyeux. Pour plus de détail sur l'interprétation géomorphologique des indicateurs, nous nous référons au rapport de E. Joyeux (2005).

2.3.1. Type de nappe Souterraine

Cet indicateur est calculé dans ces deux premières étapes, selon la même méthode de E. Joyeux, à savoir l'intersection de la couche « Corridors » avec la couche « masses d'eau souterraines » et la capture de cette information au sein des corridors.

Pour le codage, nous nous sommes basés sur le codage précédent pour qualifier le type de nappe (0.1 pour type captive, 0.5 pour le type libre et captif et 0.9 pour le type libre). La différence, avec la méthode précédente, c'est que nous avons affecté des codes pondérés par la surface, selon le pourcentage de surface de chaque type de nappe, rapporté à la surface du corridor. La formule s'écrit alors de la manière suivante.

$$\text{Code}_{\text{Corridor}} = \frac{\sum (\text{Code}_{\text{type de nappe}} * \text{surface}_{\text{type de nappe}})}{\sum (\text{Surface}_{\text{type de nappe}})}$$

L'exemple ci-dessous illustre, l'importance de la pondération du codage par la surface selon le type de nappe. Le corridor ci-dessous (en rouge) se situe à 60 % sur une nappe de type « Captif » et à 40 % sur une nappe de type « Libre ». Le codage du corridor, selon la formule ci-dessous, sera égal à $0.1*60\% + 0.9*40\%$, soit 0.42. Alors que dans la méthode E. Joyeux, le code attribué au corridor, est celui de la surface majoritaire au sein du corridor, soit 0.9.

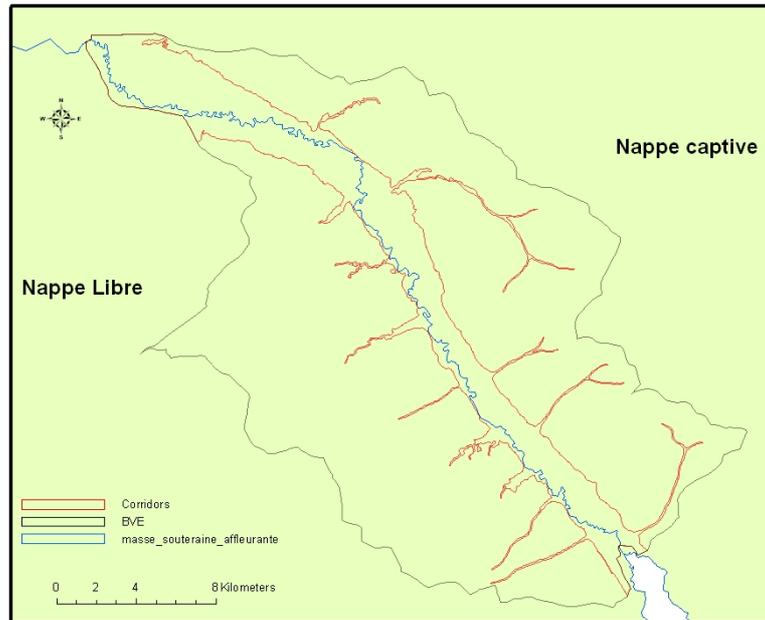


Figure 2.2. Codage d'un corridor situé au entre deux types de nappe souterraine

2.3.2. Type de végétation

L'information de cet indicateur est extraite de la base « Corine-Land-Cover ». Le codage proposé ici diverge par rapport à la méthode précédente dans l'attribution des codes selon le type de végétation mais aussi dans le codage lui-même. Les tableaux ci dessous montre les codes attribués aux types de végétations, comparés à ceux donnés auparavant. Le principe, dans le nouveau codage, est d'attribuer deux classes de végétation, à la place de trois. La première classe est dotée d'un facteur important, et implique, lors de sa présence dans le corridor, une attribution d'un potentiel important à cet indicateur. Alors que la deuxième classe, si elle est majoritaire dans le corridor fluvial, attribue un potentiel faible à ce critère.

Tableau 2.1a. Codage selon la méthode E. Joyeux

Type de végétation	Code
Forêt et végétation arbustive en mutation	0.9
Végétation sclérophylle	
Landes et broussailles	
Forêts de feuillus	
Forêts de conifères	
Forêts mélangées	
Végétation clairsemée	0.5
Tourbières	
Marais intérieurs	
Pelouses et pâturages naturels	
Prairies	0.1
Terres arables	
Cultures permanentes	
Zones agricoles hétérogènes	

Tableau 1.1.b Codage proposé

Type de végétation	Code
Forêt et végétation arbustive en mutation	0.9
Végétation sclérophylle	
Landes et broussailles	
Forêts de feuillus	
Forêts de conifères	
Forêts mélangées	
Prairies	0.1
Tourbières	
Marais intérieurs	
Pelouses et pâturages naturels	
Végétation clairsemée	0.1
Terres arables	
Cultures permanentes	
Zones agricoles hétérogènes	

Le même principe de pondération des codes a été adopté, car un corridor peut contenir plusieurs types de végétation. La figure ci-dessous montre qu'au sein d'un corridor, plusieurs types de végétation peuvent exister.

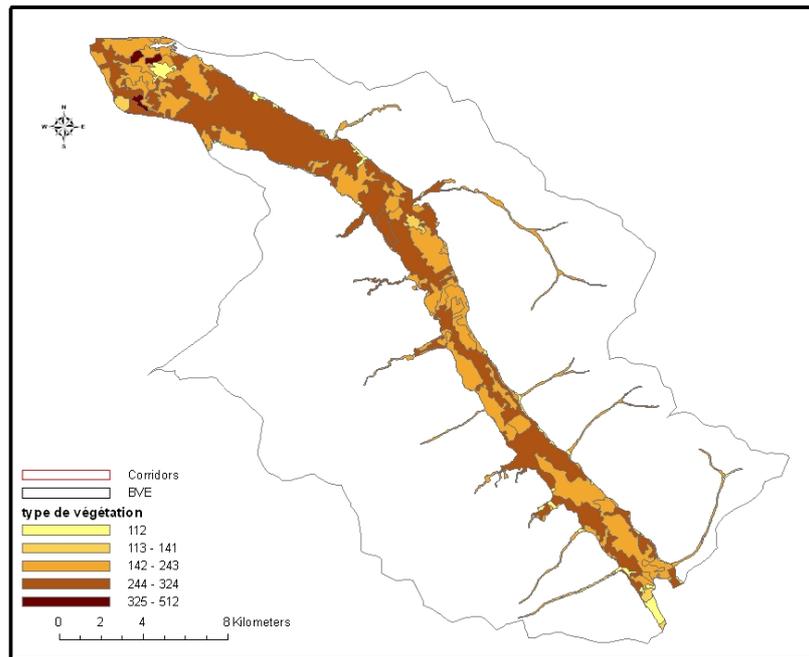


Figure 2.3. Distribution de la végétation au sein d'un corridor

Le codage réalisé par Joyeux (2005) attribue le code « Type de végétation » selon la surface majoritaire. Si celle-ci est de type 1, le code attribué au corridor est égal à 0.9. Dans notre cas, le code, est calculé selon la formule ci-dessous.

$$\text{Code}_{\text{Corridor}} = \frac{\sum (\text{surface}_{(\text{type de végétation classe 1})} * 0.9) + \sum (\text{surface}_{(\text{type de végétation classe 2})} * 0.1)}{\sum (\text{Surface}_{\text{classe 1} + \text{classe 2}})}$$

2.3.3. Sinuosité

Cet indicateur est calculé à partir de la couche « Corridors » et la couche « BD Carthage ». La méthode de calcul définie par E. Joyeux a été conservée dans notre travail. Elle consiste à calculer la moyenne des sinuosités des USE 250 m au sein du corridor fluvial. En suite le codage de la sinuosité est affecté aux corridors de la manière suivante :

- IS < 1.05 : lit rectiligne,
- IS > 1.05 : lit sinueux,

Où IS est la sinuosité du corridor.

Tableau 2.2.. Le Codage de la sinuosité selon la méthode E. Joyeux

Sinuosité	Code
IS < 1.05	0.1
IS > 1.05	0.9

2.3.4. Pente maximale

Cet indicateur calcule la pente maximale, en pourcentage, au sein du corridor fluvial. Cette information est calculée à partir d'un Modèle Numérique de Terrain MNT. Le logiciel ArcGIS le calcule automatiquement. Le codage, définie par E. Joyeux, affecte 3 valeurs selon l'importance de la pente. Le codage est le suivant.

Tableau 2.3. Le codage de la pente selon la méthode E. Joyeux

Pente (%)	Code
> 2.5	0.1
1 à 2.5	0.5
0 à 1	0.9

Dans notre travail, nous avons estimé, que la pente est une information normalisée et continue. Nous n'avons, donc, pas besoin de la répartir en trois classes, car cette segmentation ne peut qu'appauvrir cette information. Le schéma ci-dessous montre la distribution des valeurs selon le codage proposé par E. Joyeux (cf. Figure 2.4.) et la distribution des vrais valeurs de la pente sur tous les cours d'eau du bassin de la Seine (cf. Figure 2.4.).

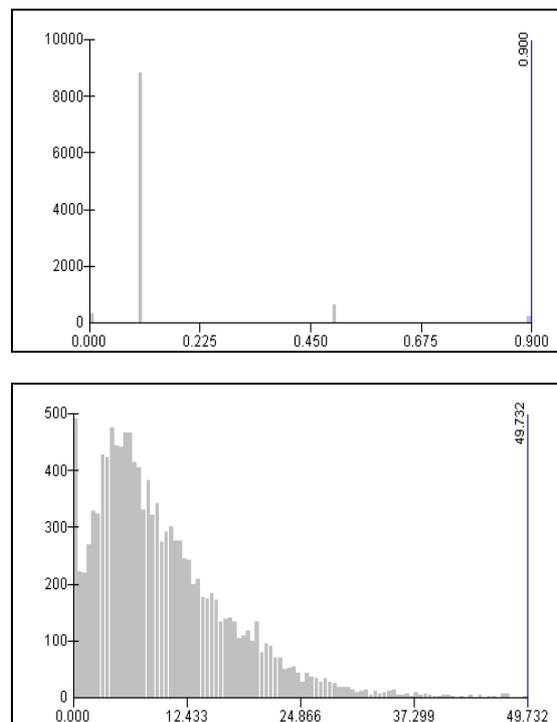


Figure 2.4. Distribution des effectifs selon le codage de la pente par E. Joyeux (figure supérieure), et en absence de codage comme proposé ici (figure inférieure)

Pour conserver l'information de la pente au sein de l'indicateur, nous avons décidé de considérer cet indicateur comme étant la normalisation des valeurs propres de la pente en les normalisant dans l'intervalle [0,1]. Par ailleurs, nous considérons que la pente est inversement proportionnelle à la fonctionnalité. Autrement dit, plus la pente est forte moins la fonctionnalité du corridor est importante et inversement. La normalisation sera donc inverse, elle attribuera les plus hautes valeurs aux pentes les plus faibles et inversement, selon formule suivante :

$$\text{Indicateur de la Pente} = \frac{(\text{Pente}_{\min} - \text{Pente})}{(\text{Pente}_{\max} - \text{Pente}_{\min})} + 1$$

La figure ci-dessous montre que l'indicateur donne une distribution d'effectif, dans un intervalle normalisé [0-1], inverse à celle des pentes.

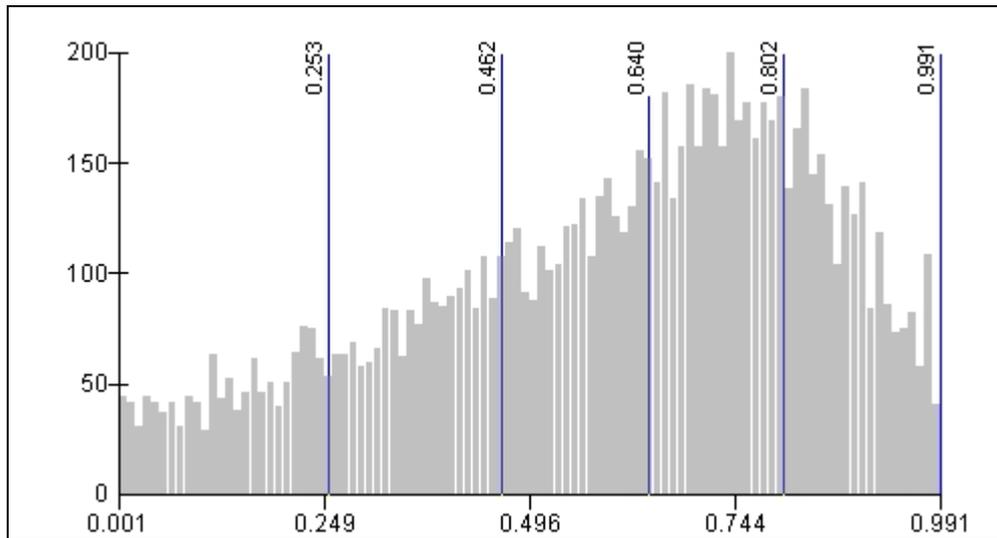


Figure 2.5. Distribution des valeurs de l'indicateur de pente selon la méthode de normalisation

2.3.5. Gravières et plans d'eau

Cet indicateur est calculé à partir de la couche « Corridors » et la Couche « Corine-Land-Cover ». La méthode de calcul est la même que celle définie par l'indicateur « Type de végétation ». L'ancien codage, défini par E. Joyeux, est maintenu mais les valeurs du code sont pondérées par la surface.

Tableau 2.4. Codage de la présence des gravières et selon la méthode E. Joyeux

Gravières/plans d'eau (%)	Code
0	0.1
1 à 5	0.5
> 6	0.9

$$\text{Code}_{\text{Corridor}} = \frac{\sum (\text{surface}_{\text{(gravière classe 1)}} * 0.1) + \sum (\text{surface}_{\text{(gravière classe 2)}} * 0.5) + \sum (\text{surface}_{\text{(gravière classe 3)}} * 0.9)}{\sum (\text{Surface}_{\text{classe1+classe2+classe3}})}$$

2.3.6. Obstacles

L'indicateur « Obstacles » est calculé à partir de la couche « Corridors » et la Couche « BD Carto ». Le codage défini dans le travail de E. Joyeux a été conservé, bien que celui-ci puisse être amélioré. Ce codage attribue une valeur de 0.1 à l'indicateur s'il n'y a aucun obstacle dans le corridor, 0.5 si la densité des obstacles est entre 0 et 0.0002 m/m² et 0.9 pour une densité d'obstacles supérieure à 0.0002 m/m² :

Tableau 2.5. Codage de l'indicateur Obstacles selon la méthodologie d'E. Joyeux

Obstacles (m/m)	Code
0	0.1
0 à 0.0002	0.5
> 0.0002	0.9

Ce codage a été conservé dans notre démarche. Toutefois, celui-ci pourrait être amélioré par conservation de la densité, en modifiant l'unité de m/m² à m/km², et la normalisation des valeurs obtenues dans un intervalle de 0 et 1 par une normalisation selon la formule ci-dessous :

$$\text{Densité Normalisée} = (\text{Densité} - \text{Densité}_{\text{minimale}}) / (\text{Densité}_{\text{maximale}} - \text{Densité}_{\text{minimale}})$$

2.3.7. Barrages et écluses

Cet indicateur, calcule la densité des barrages, au sein des corridors fluviaux. Il est calculé à partir de la couche « Corridors » et la couche « Barrage ». Le précédent codage a été conservé. Le tableau ci-dessous donne les codes en fonction de la densité.

Tableau 2.6.. Codage de l'indicateur barrage selon la méthode E. Joyeux

Barrages/écluses (nb/km ²)	Code
0	0.1
1 à 2	0.5
> 3	0.9

Mais une fois encore, ce codage peut biaiser l'information, alors qu'il suffit de conserver la densité des barrages pour une meilleure représentativité de l'information. Mais pour mettre cet indicateur dans le même ordre de grandeur que les autres indicateurs, il suffit de normaliser la densité des barrages selon la formule ci-dessus.

2.3.8. Chenaux secondaires et connexion

Cet indicateur mesure la densité linéaire des chenaux secondaires et connexions au sein des corridors. Les couches nécessaires à ce calcul sont la couche « Corridors » et la couche « Carthage ». Le codage donné par E. Joyeux est illustré, dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2.7. Codage de l'indicateur de la densité des chenaux selon E. Joyeux.

Densité/connexion chenaux (m/m ²)	Code
aval-amont/gravière	0.1
aval	0.5
amont/sans	0.9

Pour améliorer cet indice, nous avons pondéré les densités des connexions par la surface des corridors. La formule est la suivante :

$$\text{DensitéCodée}_{\text{corridor}} = [(\text{Longueur Chenaux}_{\text{Classe1}} * \text{Code}_{\text{Classe1}}) + (\text{Longueur Chenaux}_{\text{Classe2}} * \text{Code}_{\text{Classe2}}) + (\text{Longueur Chenaux}_{\text{Classe3}} * \text{Code}_{\text{Classe3}})] / \text{Surface du corridor.}$$

Les codes attribués aux corridors, suite à ce calcul, ne sont donc pas des seuils de 0.1, 0.5 et 0.9, mais un spectre de valeurs comprises dans l'intervalle [0 à 1], car il est pondéré par l'ensemble des classes en fonction de leur importance au sein d'un corridor fluvial.

2.3.9. Largeur de la plaine alluviale

Cet indicateur a été calculé à partir des Unités Spatiales Élémentaires (les USEs). Le codage a été conservé, selon la méthode E. Joyeux.

Tableau 2.7. Codage de l'indicateur de la largeur de la plaine alluviale selon E. Joyeux

Largeur de la plaine alluviale (m)	Code
0 à 100	0.1
100 à 1000	0.5
> 1000	0.9

Mais une autre méthode, pourrait être proposée. Il s'agit de normaliser le rapport de largeur entre la largeur du corridor fluvial et la largeur de son lit mineur. Ce rapport pourrait être calculé de la manière suivante : Rapport de largeur = largeur de corridor / largeur rivière. Les valeurs obtenues sont ensuite normalisées selon la formule suivante :

Indicateur de largeur = (Rapport de largeur - Rapport de largeur_{min}) / (Rapport de largeur_{max} - Rapport de largeur_{min})

Cette information serait plus précise et plus significative, de point de vue géomorphologique, pour qualifier la largeur de la plaine alluviale.

2.3.10. Morphologie de la plaine alluviale

Pour cet indicateur, calculé à partir des USE, le codage initial, proposé par E. Joyeux, a été conservé, avec une pondération par les surfaces des classes au sein du corridor.

Tableau 2.8. Codage de l'indicateur de la morphologie de la plaine alluviale selon E. Joyeux

Morphologie de la plaine alluviale	Code
sub-horizontale	0.1
dépression/levée	0.5
dépression/montille	0.9

Comme pour l'indicateur « Type de végétation », nous avons supposé qu'au sein d'un corridor, il est possible de trouver plusieurs classes morphologiques. La pondération, du codage, par la surface de chaque classe, attribue aux corridors un code selon l'importance surfacique de la classe au sein du corridor.

Le codage se fait de la manière suivante :

Code Morphologie_{corridor} = (Surface_{Classe1} * Code_{Classe1}) + (Surface_{Classe2} * Code_{Classe2}) + (Surface_{Classe3} * Code_{Classe3}) / Surface du corridor.

2.3.11. Revêtement sédimentaire

Cet indicateur est calculé à partir de la couche « USE». Comme l'indicateur précédent, le codage, défini par E. Joyeux, a été conservé, mais il a été pondéré par les surfaces des classes se trouvant au sein de chaque corridor.

Tableau 2.9. Codage de l'indicateur de revêtement sédimentaire selon E. Joyeux

Type de revêtement	Code
minéral	0.1
mixte	0.5
organique	0.9

De la même manière que les autres indicateurs, celui-ci est calculé selon la formule ci-dessous :

$$\text{Code revêtement}_{\text{corridor}} = (\text{Surface}_{\text{Classe1}} * \text{Code}_{\text{Classe1}}) + (\text{Surface}_{\text{Classe2}} * \text{Code}_{\text{Classe2}}) + (\text{Surface}_{\text{Classe3}} * \text{Code}_{\text{Classe3}}) / \text{Surface du corridor}.$$

2.4. Calcul de l'indice

2.4.1. Mode de calcul

Deux indices avaient été proposés par Edith Joyeux : un indice 'Crue' et un indice 'Nitrates'. Mais les deux indices sont calculés de la même manière et à partir des mêmes indicateurs, à l'exception d'un seul indicateur, où le codage est inversé entre l'indice de crue et l'indice de nitrates (Le code 0.9 est affecté à la morphologie à dépression/montille pour l'indice de crue alors que celui-ci est affecté à la morphologie à dépression/levée pour l'indice de nitrates). La visualisation des résultats montre que cette inversion de codage est négligeable pour différencier les deux indicateurs. Nous avons, donc, décidé de conserver un seul indice pour la fonction des crues et de la rétention de nitrate.

Cet indice est calculé, selon la précédente méthode, comme une moyenne arithmétique des onze indicateurs, selon la relation ci-dessous :

$$\text{Indice fonctionnel} = (\text{Type_nappe} + \text{Sin} + \text{Pente_max}_{\text{corridor}} + \text{Type_veg} + \text{Gr-eau_pc} + \text{Ds_obs} + \text{Bar_km}^2 + \text{Ds_co} + \text{Larg_m} + \text{Type_morph} + \text{Type_rev}) / 11$$

Cela signifie que chaque indicateur dispose du même poids et influence le calcul de l'indice de la même manière. Pour permettre de pondérer l'importance relative de certains indicateurs par rapport aux autres, nous avons introduit la possibilité d'affecter un poids variable à chacun des indicateurs. L'indice de fonctionnalité des Crues et des Nitrates sera donc calculé selon la relation suivante :

$$\text{Indice fonctionnel} = (a_1 * \text{Type_nappe} + a_2 * \text{Sin} + a_3 * \text{Pt_cor_max} + a_4 * \text{Type_veg} + a_5 * \text{Gr-eau_pc} + a_6 * \text{Ds_obs} + a_7 * \text{Bar_km}^2 + a_8 * \text{Ds_co} + a_9 * \text{Larg_m} + a_{10} * \text{Type_morph} + a_{11} * \text{Type_rev}) / (a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_5 + a_6 + a_7 + a_8 + a_9 + a_{10} + a_{11})$$

Où $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}$ sont les poids affectés à chaque indicateur.

En attendant la validation des indicateurs et de l'indice, ces poids ne seront pas fixés. Nous laissons aux utilisateurs, la possibilité de construire leur indice selon les poids respectifs qui leur semble les plus pertinents. L'indice d'E. Joyeux représente le cas où tous les poids des indicateurs sont égaux pour le calcul de l'indice.

2.4.2. Comparaison entre le mode de calcul d'Edith Joyeux et la méthode de pondération des surfaces

Avant d'aller plus loin dans la présentation de la méthodologie, il est nécessaire de comparer les résultats du calcul de l'indice selon la méthode E. Joyeux et ceux obtenus selon notre mode de calcul, basée sur la pondération par les surfaces. Les cartes 2.6 et 2.7 ci-dessous présentent la comparaison de ces résultats.

Pour pouvoir comparer les résultats entre l'indice E. Joyeux et notre indice, les mêmes seuils de classes ont été appliqués (7 classes, avec un pas de 0.1). L'observation des deux cartes montre des différences importantes. Sur la carte calculée selon notre méthode, nous trouvons plus de zones fonctionnelles notamment dans la réserve de la Bassée, dans le bassin de la Seine et Marne et dans la Tourbe. Portant, l'observation des distributions statistiques des corridors montre une distribution similaire (Fig. 2.8 et 2.9). Les classes majoritaires, pour les deux méthodes, sont la classe 0.4 de niveau d'efficacité moyenne, la classe 0.3 de niveau d'efficacité médiocre et la classe 0.5 de bon niveau d'efficacité. Néanmoins la carte de niveau d'efficacité, établie selon la méthode E. Joyeux, attribue un niveau de fonctionnalité majoritairement très faible (classe 0.1 en rouge) à la basse Normandie, alors que cette même région est caractérisée, dans la nouvelle carte, par une distribution beaucoup plus diversifiées des indices d'efficacité.

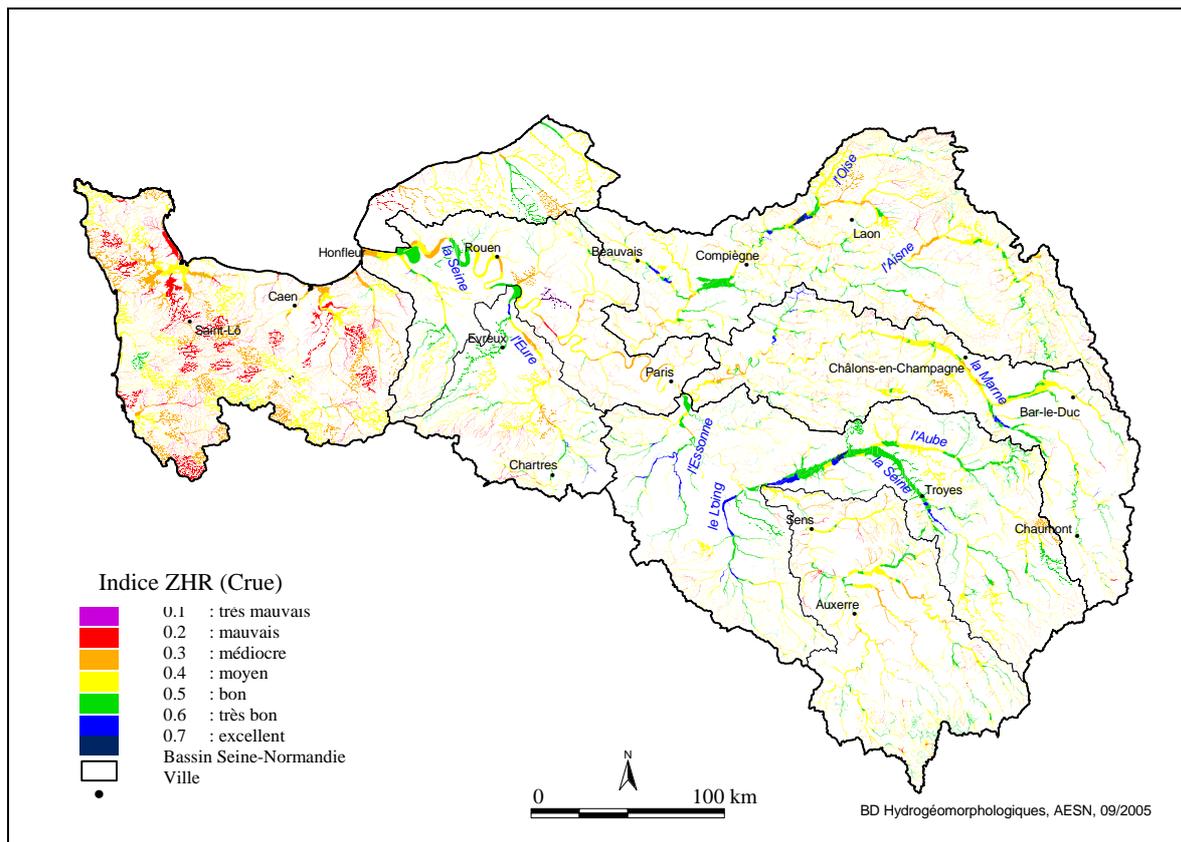


Figure 2.6. Carte de l'indice calculé selon la méthode E. Joyeux.

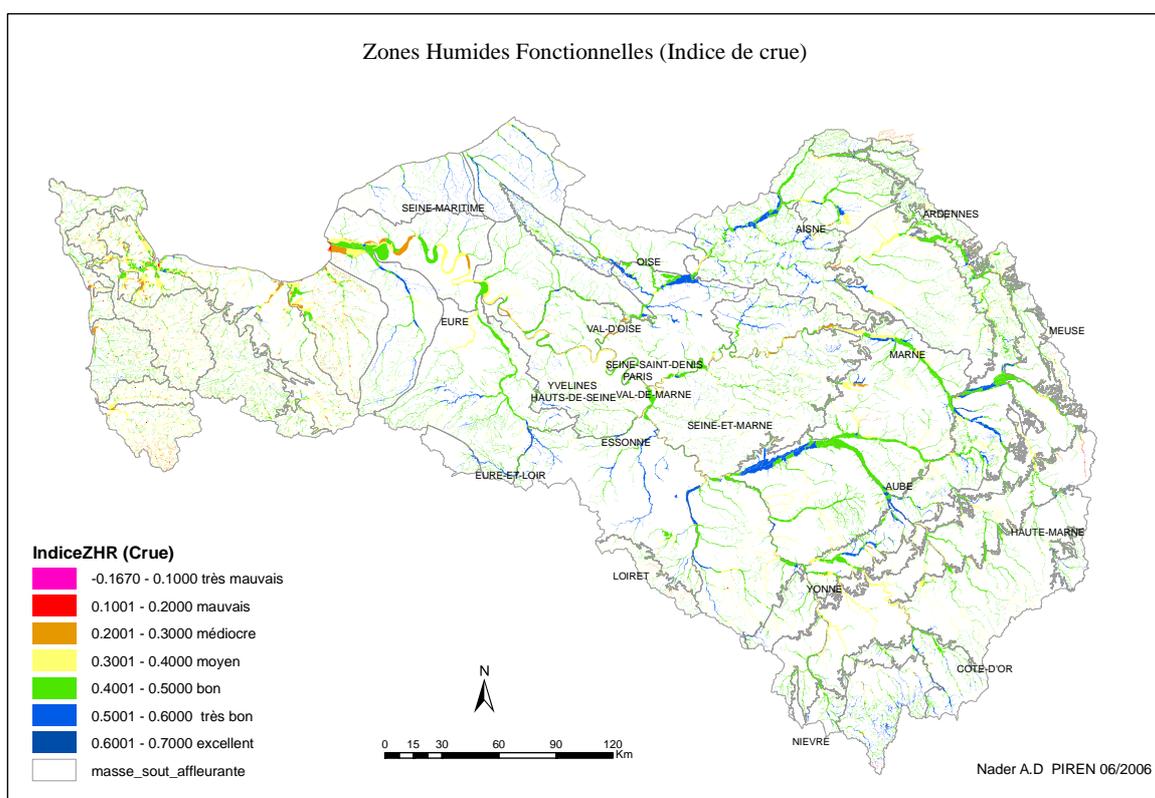


Figure 2.7. Carte de l'indice calculé avec pondérations des surfaces et poids des indicateurs =1.

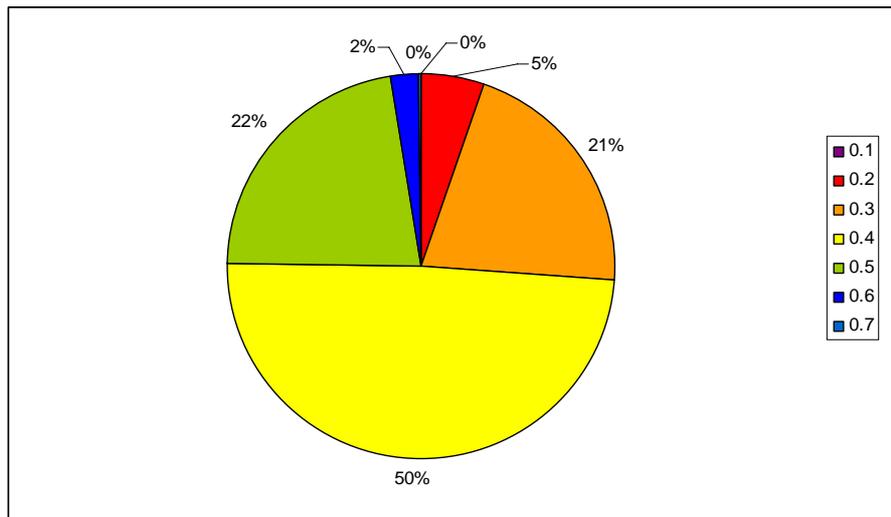


Figure 2.8. Distribution des effectifs de chaque classe de l'indice selon la méthode E. Joyeux.

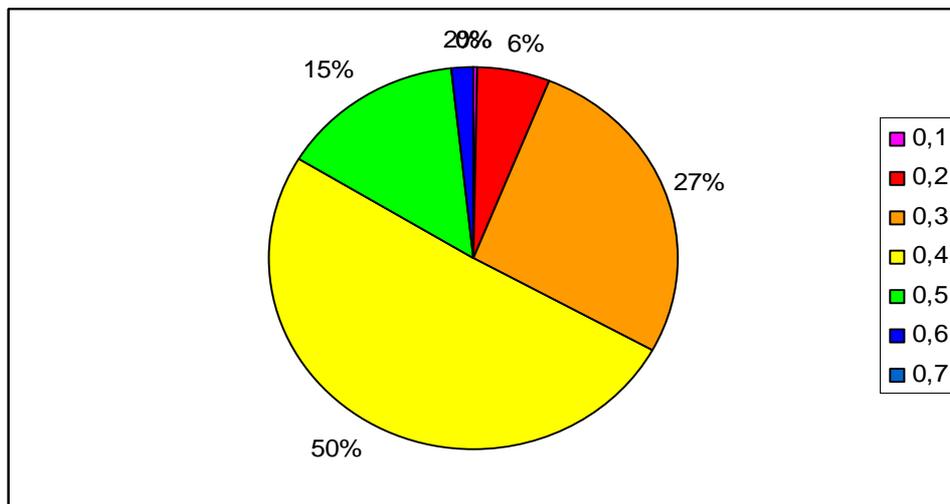


Figure 2.9. Distribution des effectifs de chaque classe de l'indice selon la méthode proposée (méthode des pondérations de surfaces).

2.4.3. Comparaison entre le mode de calcul d'Edith Joyeux et la méthode de pondération des surfaces

La figure 5.10. montre le calcul d'indice réalisé avec la méthode préconisée ci-dessus en ce qui concerne le codage de la largeur du corridor (pondéré ici par la largeur du lit mineur) et la pente (codée en continu au lieu de classes discrètes), et la nouvelle codification de la végétation. La figure 5.11 montre la répartition des effectifs dans les différentes classes résultantes. La comparaison avec les cartes 2.6 et 2.7, et avec les figures 2.8 et 2.9 montre combien l'évaluation d'un indice peut dépendre du choix de la manière de le construire. Le caractère quelque peu arbitraire de ces classifications doit donc être gardé à l'esprit.

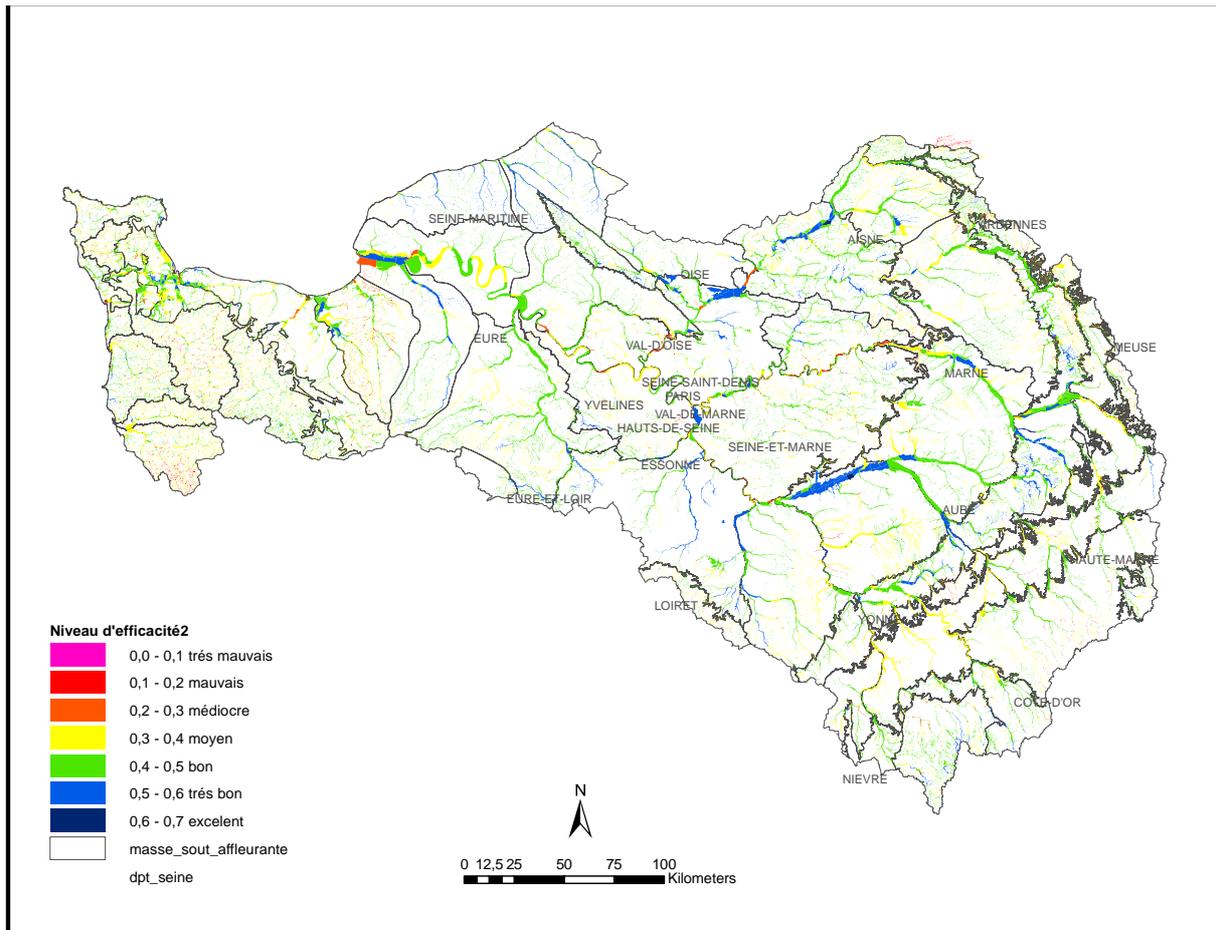


Figure 5.1. Carte de l'indice des zones humides riveraines après la modification du codage des critères largeur de la plaine, pente maximale et type de végétation, selon la méthode de normalisation. La carte et les statistiques ci-dessous montrent que cette méthode met en évidence plus de zones fonctionnelles par rapport aux cartes précédentes (5 % au lieu de 2 %). Ces zones sont localisées dans la Baissée et au sud de la Marne

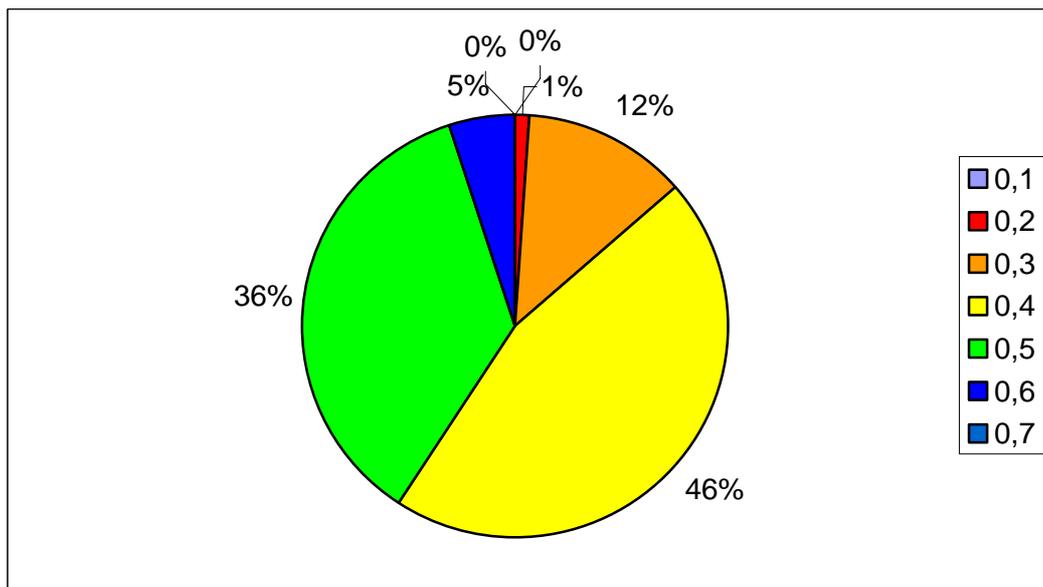


Figure 5.11. Distribution des effectifs de l'indice ZHR suite à la normalisation des 3 critères, largeur de la plaine, pente maximale et type de végétation.

2.5. Etape de conception de l'interface

Pour faciliter et systématiser les calculs des indices, il était nécessaire d'automatiser les différentes étapes. Une interface a été réalisée pour permettre à un utilisateur non expérimenté de réaliser une carte d'indice sur tout ou partie du district Seine-Normandie. La conception de cette interface vise à laisser la plus grande souplesse à l'utilisateur, tant pour les données d'entrées que pour les résultats en sortie. En entrée l'utilisateur peut charger les couches nécessaires aux calculs quels que soient leurs noms et il peut appliquer le calcul sur toute la base ou une partie. En sortie l'utilisateur peut choisir les pondérations à affecter à chaque critère pour réaliser sa carte d'indice. L'interface a été programmée en langage VBA intégré à ArcGis. Le fonctionnement de cette interface est donc lié à la présence de ces outils. L'interface est composée de plusieurs Menus, comme illustré sur les figures 2.10 et 2.11.

- Menu principal : c'est le menu à partir duquel les sous-menus sont lancés. Il permet de vérifier les étapes des sous-menus.
- Menu de chargement des couches : il permet de charger les couches servant aux calculs des indicateurs et de vérifier les champs qui les composent. Si les champs nécessaires aux calculs ne sont pas présents dans la table d'une couche, l'interface refuse de la charger. Quand toutes les couches sont chargées, Un fichier paramètres enregistre le nom de ces couches dans le répertoire de travail. Cela évite de les recharger à chaque fois que l'interface est lancée.
- Menu de corridors : il permet de constituer automatiquement la couche des corridors fluviaux à partir de la Couche des USEs (unités spatiales élémentaires de 250 m) et de la couche des sous bassins élémentaires. Le calcul des champs de cette couche est pondéré par la surface des USEs qui les constituent. Une fois la couche constituée, elle est enregistrée automatiquement au répertoire de travail et le nom de la couche est enregistré dans un fichier paramètres pour éviter de le recalculer à chaque lancement de l'interface.
- Menu de calcul des critères : c'est le menu qui permet de lancer les calculs des 11 critères. Chaque critère est calculé et affecté à la couche des corridors sous forme d'un champ. L'utilisateur n'intervient pas dans les opérations de calculs.
- Menu de traitement de l'indice : il permet de calculer l'indice, à partir des 11 critères selon les pondérations choisies chaque critère, et de classer cet indice afin de réaliser la carte.

Une notice détaillée du maniement de l'interface est présentée en annexe.

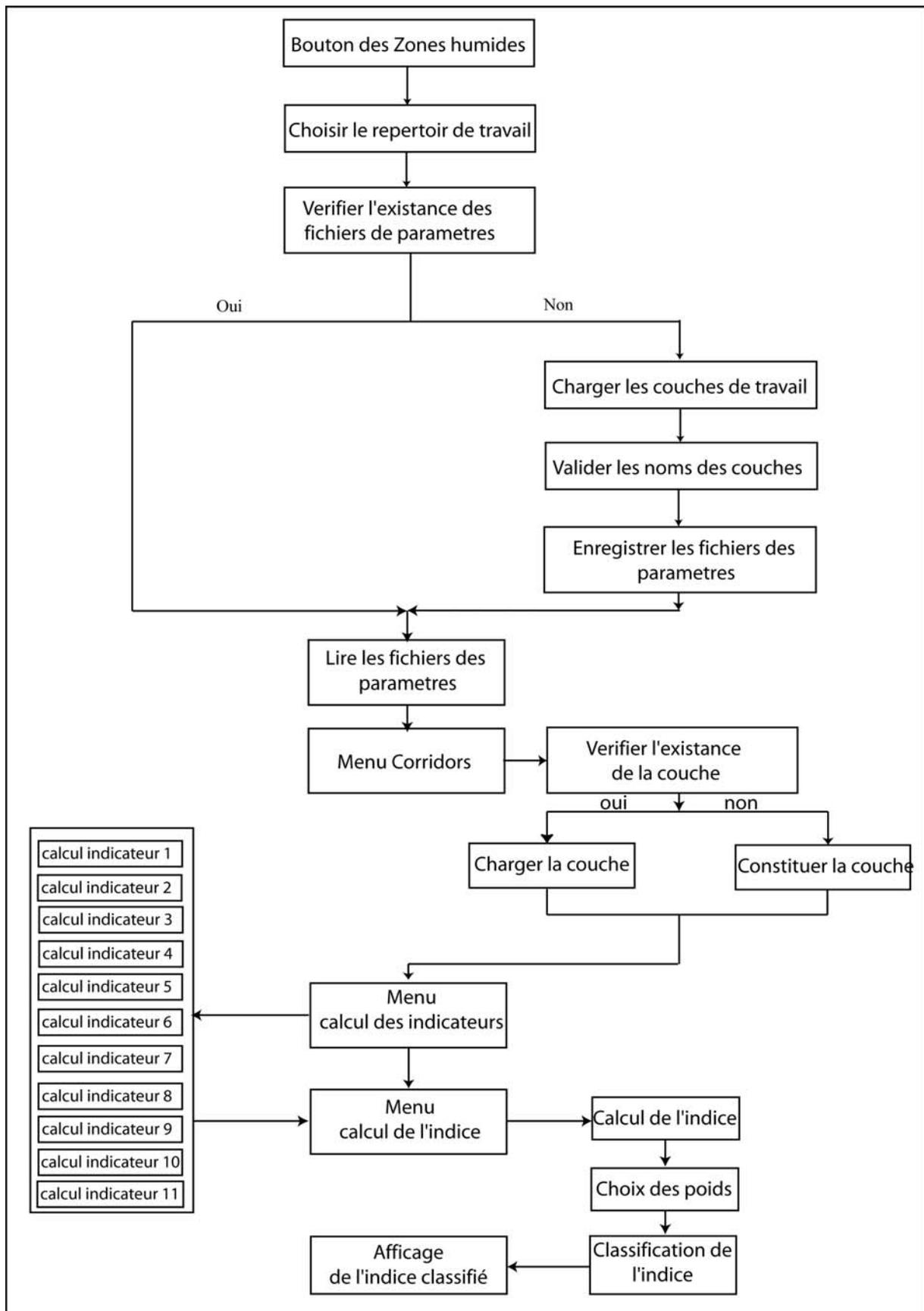


Figure 2.10. Organigramme du fonctionnement de l'interface des calculs de l'indice des zones humides

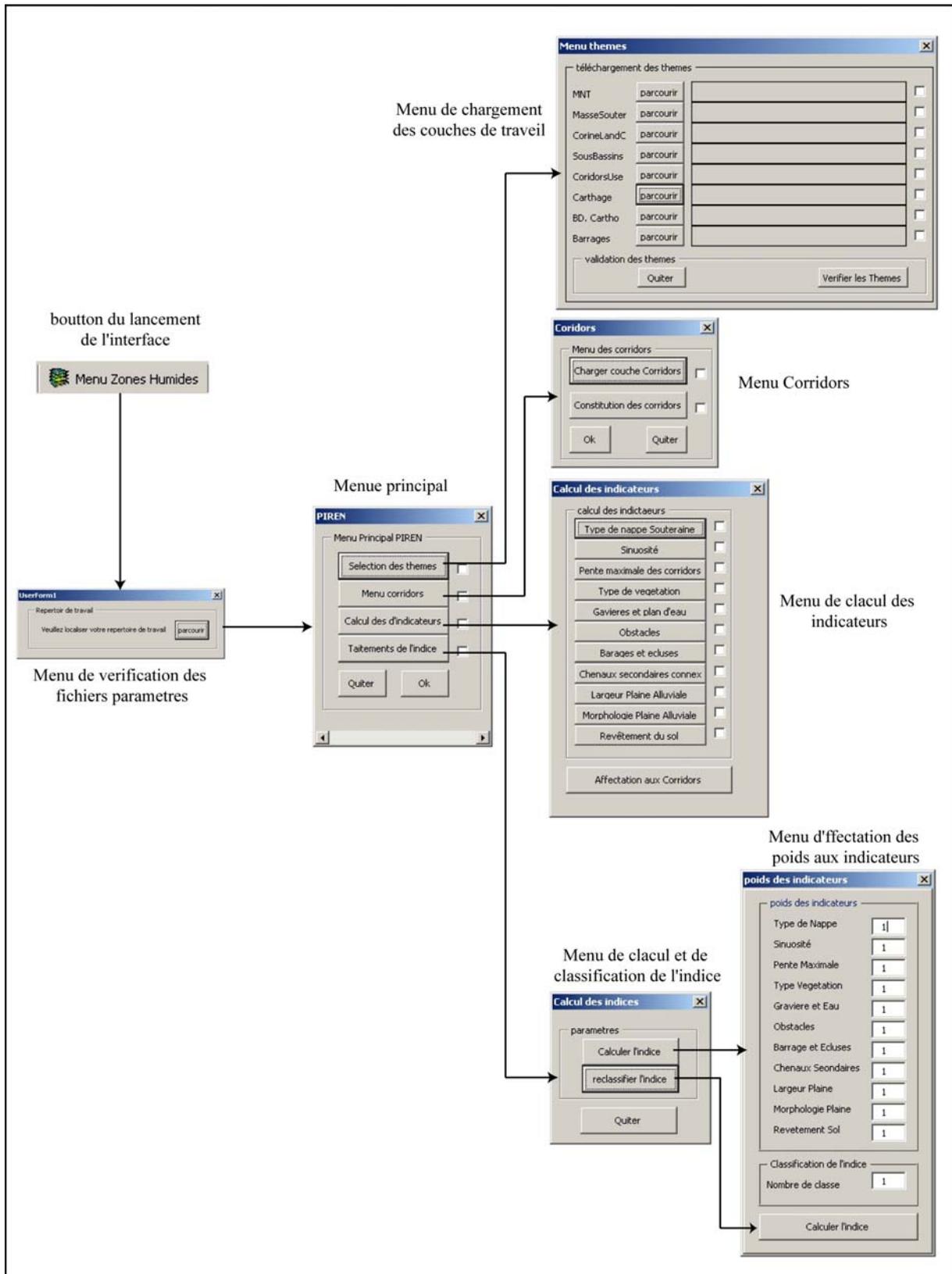


Figure 2.11. Présentation de l'architecture des principaux menus de l'interface de calcul de l'indice

4. Etape de caractérisation géomorphologique des zones humides riveraines

A coté du calcul d'indices empiriques, présenté ci-dessus, basé sur la combinaison de critères relatifs à diverses caractéristiques mesurables des corridors fluviaux, une autre approche de caractérisation des corridors fluviaux a été proposée dans le cadre des travaux du PIREN-Seine, basée sur une interprétation des types de corridors fluviaux en fonction des conditions de leur genèse depuis la dernière glaciation, et de la mise en place progressive de leur revêtement alluvionnaire (S. Gaillard). Cette approche utilise les mêmes bases de données détaillées que l'approche du calcul d'indices, mais les interprète d'une manière plus subtile pour aboutir à une typologie qui reflète le fonctionnement géomorphologique des corridors fluviaux. Le lien entre cette typologie et les fonctionnalités environnementales des zones humides reste lui aussi à établir, mais l'on peut penser à priori qu'une relation forte existe entre ces types géomorphologiques et leurs fonctions hydrologiques et bio-géochimiques.

3.1. Classification théorique des zones humides riveraines

La structure des plaines et des cours d'eau résultant de processus géomorphologiques qui se réalisent à différentes échelles de temps et d'espace, nous avons cherché à replacer la compréhension des paysages de fonds de vallées et la définition des différents types de ZHR dans une perspective génétique et dynamique. La classification proposée intègre une série de variables représentatives des différentes échelles de temps et d'espace auxquelles la mise en place et le fonctionnement des hydrosystèmes fluviaux peuvent être appréhendés (Salo, 1990 ; Amoros et Petts, 1993) (Figure 3.1.)

La figure 3.2. montre les dispositifs morphostratigraphiques associés aux différents types de ZHR et leur déclinaison selon les niveaux du système de classification.

Quatre niveaux de description sont proposés. Le niveau d'entrée de la classification (niveau 1) correspond au système ZHR défini par Brinson et al. (1993) dont nous cherchons à préciser la variabilité. Les niveaux 2, 3 et 4 correspondent à l'intégration de 3 variables hydrogéomorphologiques :

- évolution du profil en long des cours d'eau (niveau 2 / pas de temps géologique) ;
- dépôts sédimentaires holocènes (niveau 3 / pas de temps holocène) ;
- mosaïques hydrogéomorphologiques (niveau 4 / pas de temps actuel).

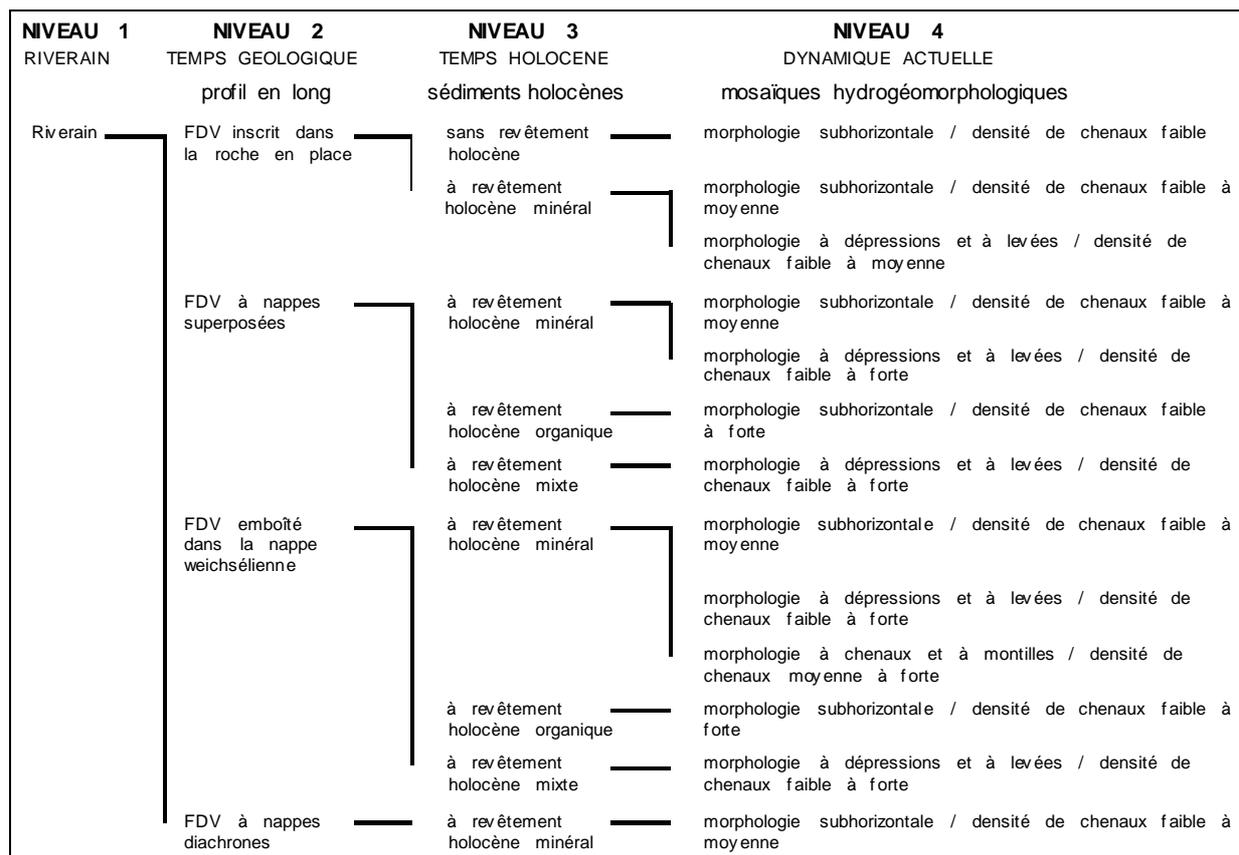


Figure 3.1 : Classification des ZHR sur des bases génétiques et dynamiques.

Les variables intégrées aux niveaux 2, 3 et 4 contrôlent des caractéristiques morphologiques et fonctionnelles des couloirs fluviaux. Les modalités retenues pour ces variables sont les suivantes :

- La variable « évolution du profil en long des cours d'eau » (niveau 1) joue sur les macroformes (largeur et pente des hydrosystèmes) ; elle comprend 4 modalités : incision, exhaussement, emboîtement et stabilité à partir desquelles on a défini 4 sous – systèmes caractérisés par des dispositifs stratigraphiques spécifiques ; comme cela a été montré, ces sous – systèmes sont contrôlés (1) par des modifications dans le rapport débit liquide/débit solide des rivières dues au changement bioclimatique postglaciaire et (2) par la pente du plancher alluvial hérité de la dernière période froide (Schumm, 1977 ; Richards, 1982) ;
- La variable « dépôt sédimentaire holocène » (niveau 3) comprend quatre modalités : absence de dépôt (i.e. fond de vallée inscrit dans la roche en place), dépôt à dominante minéral, dépôt à dominante organique, dépôt mixte ; cette variable joue sur les échanges verticaux entre les milieux de surface et de subsurface ; elle joue également sur la dynamique de l'azote via la teneur en matière organique des nappes de revêtement holocène ;
- Au niveau 4, la variable « mosaïques hydrogéomorphologiques » caractérise les mosaïques de mésoformes les plus couramment observées dans le bassin de la Seine (Gaillard, 1999) ; elle comprend 3 modalités : morphologie subhorizontale ; morphologie à levées et à dépressions ; morphologie à chenaux et à montilles ; à chacun de ces dispositifs, nous avons associé des caractéristiques relatives aux annexes hydrauliques

drainant les couloirs fluviaux (densité de chenaux secondaires faible, moyenne, forte) ; ces caractéristiques sont dépendantes des dispositifs morphologiques ainsi que des variables prises en compte aux niveaux supérieurs de la classification (niveaux 2 et 3) ; la variable « mosaïques hydrogéomorphologiques » exerce un contrôle sur les transferts d'eau et de matières dans les couloirs fluviaux lors des inondations (mise en eau, stockage et vidange des plaines fluviales, rétention des flux particulières, ...etc) ; elle intervient également sur la nature et la distribution des habitats pour la flore et la faune (Hughes, 1980 ; Lewin et Hughes, 1980 ; Dzana et Gaillard, 1995 ; Fustec et al., 1999 ; Boët, 2000).

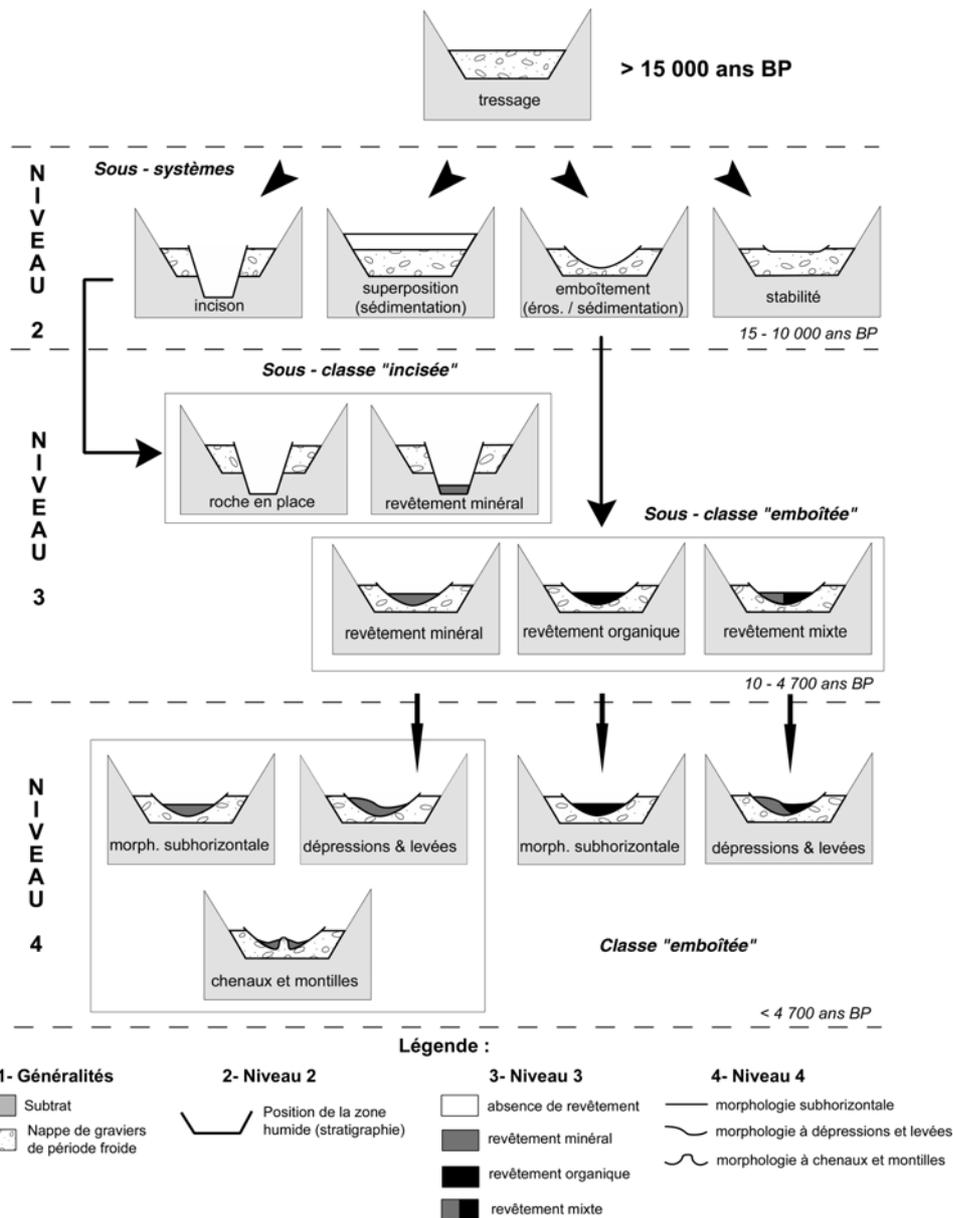


Figure 3.2 : Caractérisation morphostratigraphique des différents types de ZHR pour les niveaux 2, 3 & 4 de la classification hydrogéomorphologique.

Selon le principe d'emboîtement des échelles de temps et d'espace retenu pour cette étude, il est important de noter que les classes et sous – classes définies aux niveaux 3 et 4 ont été

induies des conditions d'évolution à long terme du système (i.e. évolution du profil en long des cours d'eau). Ceci a permis de définir au niveau 4, 13 types de paysages fluviaux.

3.2. Application de la typologie aux corridors fluviaux de Seine Normandie

L'exploitation des bases de données établies dans les études précédentes a permis d'appliquer les critères retenus pour la classification géomorphologique à l'ensemble des corridors fluviaux de Seine Normandie. Quatre couvertures ont plus particulièrement été mobilisées : l'extension des corridors fluviaux et les types de revêtements sédimentaires, le système de terrasses alluviales, les annexes hydrauliques. Ces couvertures fournissent une information spatialisée sur les ZHR à l'échelle du bassin ; elles permettent de renseigner les variables prises en compte aux différents niveaux de la classification hydrogéomorphologique.

3.2.1. Importance en surface des zones humides riveraines

La délimitation des corridors fluviaux a été faite à partir d'une interprétation hydrogéomorphologique des cartes topographiques IGN à 1/25 000e. Ces données sont issues de la couverture des corridors fluviaux présentée ci – dessus.

En considérant l'ensemble du bassin Seine – Normandie, les ZHR couvrent une superficie de 8240 km² ; soit 8.7 % du territoire. Le tableau 3.1 donne la répartition des ZHR par bassin. Les différences observées à ce niveau permettent d'opposer les bassins inscrits dans des roches calcaires et/ou crayeuses (Seine amont : 7.87 %) à ceux inscrits dans des roches granitiques et métamorphiques (Basse – Normandie : 10.1%) ; ceci matérialise le contrôle exercé par le cadre morfo – structural sur la distribution des ZHR.

NOM	surface ZHR (km ²)	surface bassin (km ²)	%
Basse Normandie	1418,56	13933,91	10,18
Basse-Seine	904,47	9846,94	9,19
Eure	465,10	6000,04	7,75
Haute-Normandie	271,23	3751,43	7,23
Marne	1111,42	12832,03	8,66
Oise	1659,06	16972,78	9,77
Seine-Amont	2418,30	30718,17	7,87
	8248,15	94055,28	

Tableau 3.1. Répartition de la surface des ZHR par bassin hydrographique

La figure 3.3 montre que la plus grande surface de zone humide riveraine est plutôt localisée le long des plus petits cours d'eau du réseau hydrographique, et non, comme on le croit parfois, dans les grandes plaines alluviales.

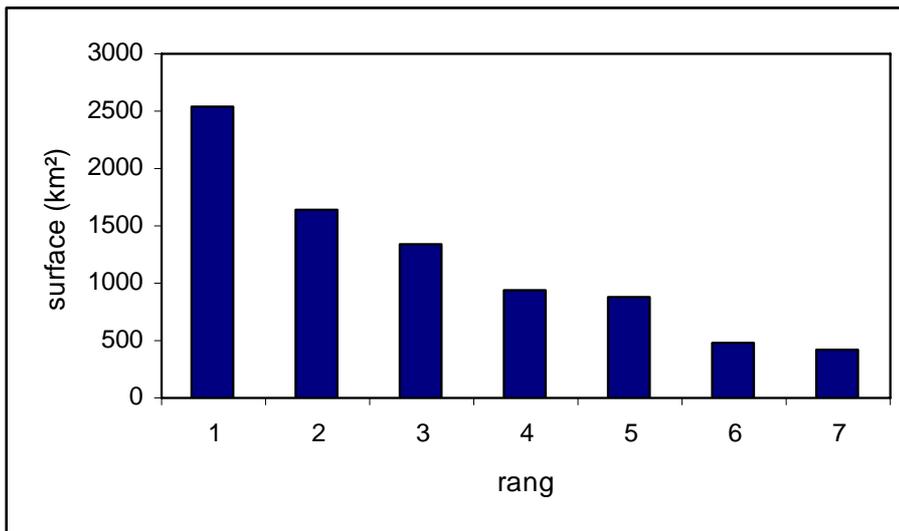


Figure 3.3. Répartition de la surface de zones humides riveraine en fonction de l'ordre de Strahler des cours d'eau

3.2.2. Typologie au niveau 2

Les résultats obtenus au niveau 2 (Fig. 3.4) sont issus du croisement des couvertures « corridors fluviaux » et « système de terrasses ». à partir desquelles il est possible d'examiner les relations stratigraphiques entre les plaines fluviales actuelles et les niveaux alluviaux plus anciens.

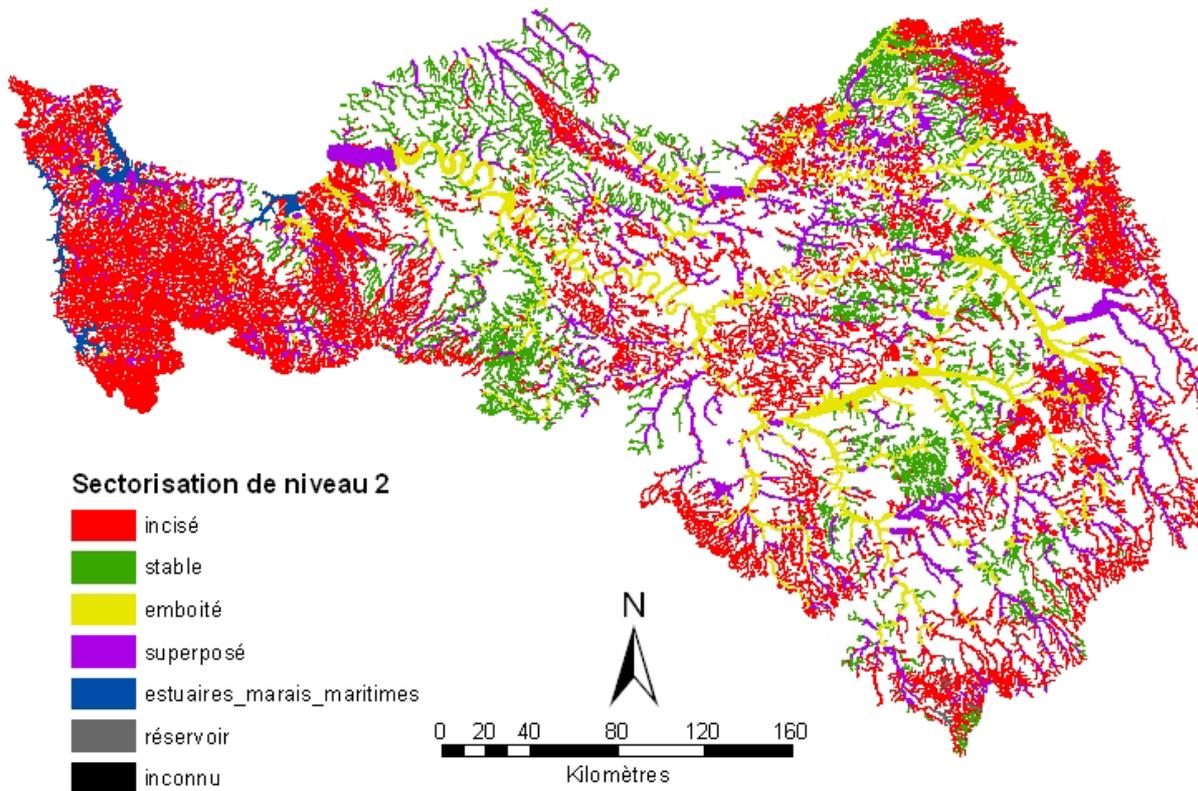


Figure 3.4. Répartition des types de zones humides riveraines définis au niveau 2 de la classification géomorphologique.

3.2.3. Typologie au niveau 3

Le niveau 3 de la classification géomorphologique intègre la nature des revêtements sédimentaires contenue également dans la couverture des corridors fluviaux (Figure 3.5).

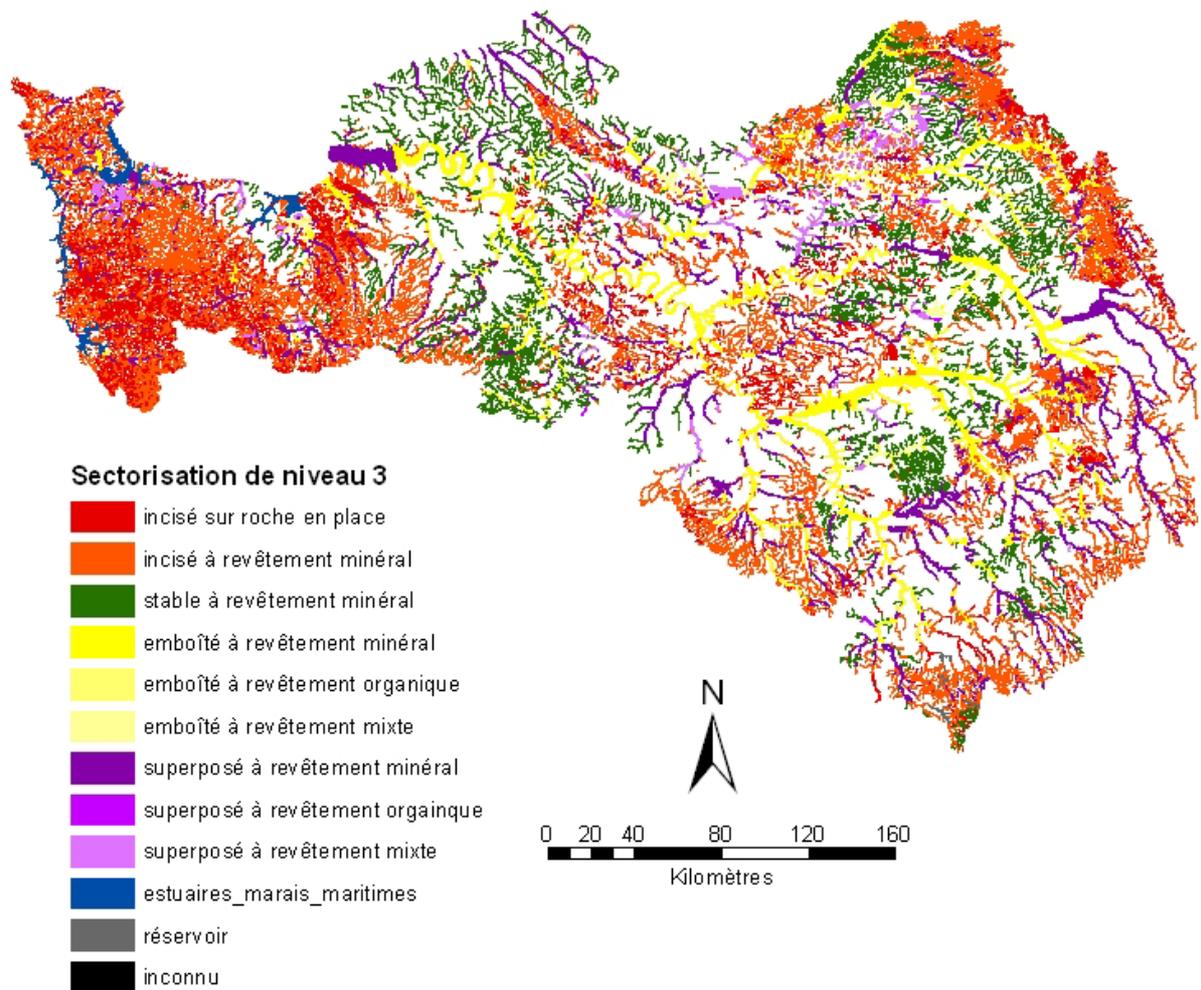


Figure 3.5. Répartition des types de zones humides riveraines définis au niveau 3 de la classification géomorphologique.

3.2.4. Typologie au niveau 4

Le niveau 4 découle de l'intégration des couvertures « annexes hydrauliques » et « mosaïques hydrogéomorphologiques » (Figure 3.6.).

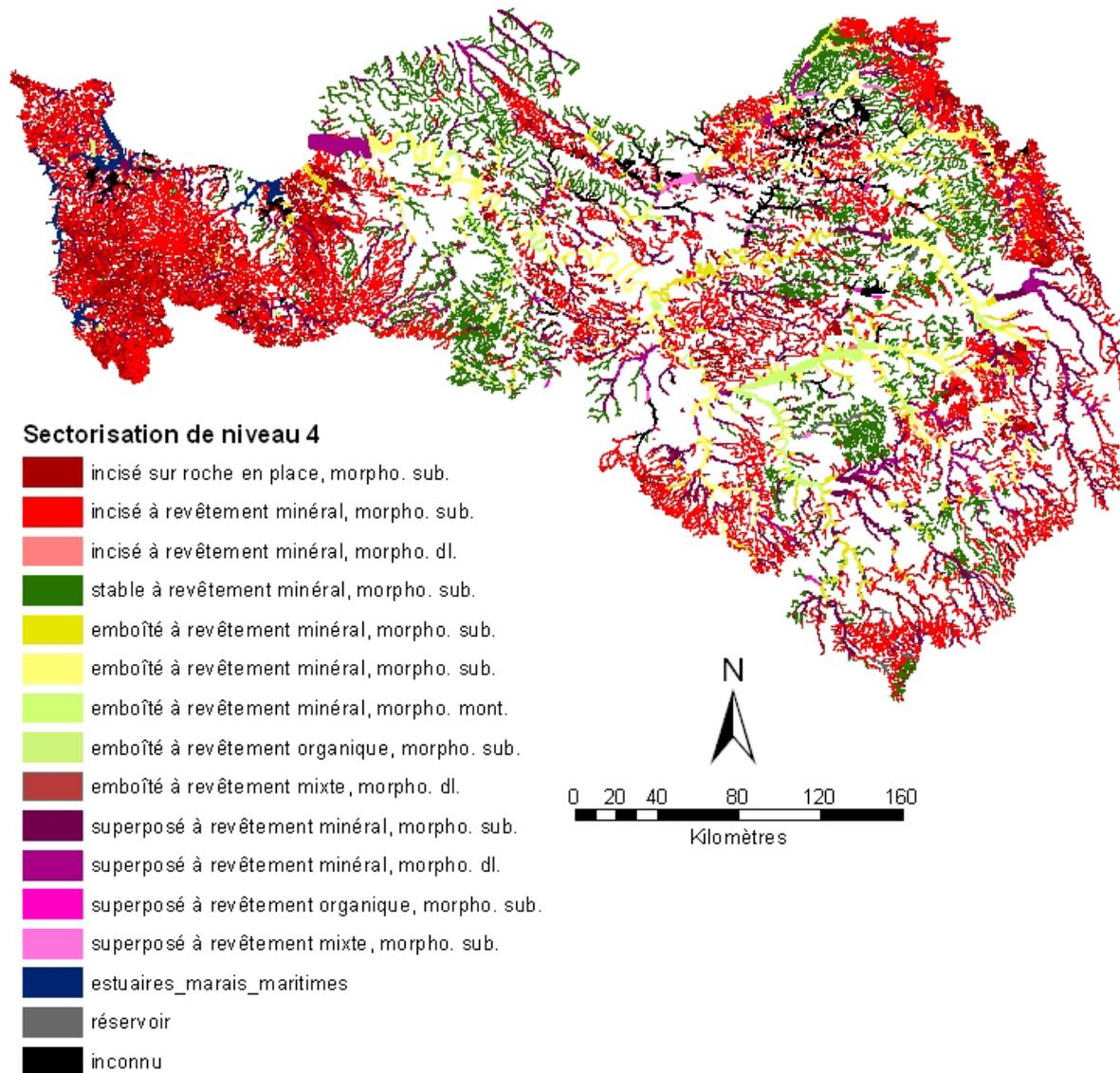


Figure 3.6. Répartition des types de zones humides riveraines définis au niveau 4 de la classification géomorphologique.

Avec 13 sous – classes discriminées au niveau 4 de la classification, l’approche retenue permet de caractériser la variabilité longitudinale des hydrosystèmes fluviaux à différentes échelles d’espace. Elle permet également de mettre en évidence des ensembles spatialement continus qui présentent des propriétés homogènes aux plans géomorphologique et fonctionnel.

La figure 3.7. montre la répartition des 4 sous – systèmes pour le niveau 2 de la classification. Les sous – systèmes caractérisés par des revêtements sédimentaires emboîtés et/ou superposés (i.e. nappes de limons holocènes couvrant des sables et graviers weichséliens) représentent plus 65 % de l’effectif. Les sous – systèmes de type incisé et stable représentent respectivement 22 et 10%.

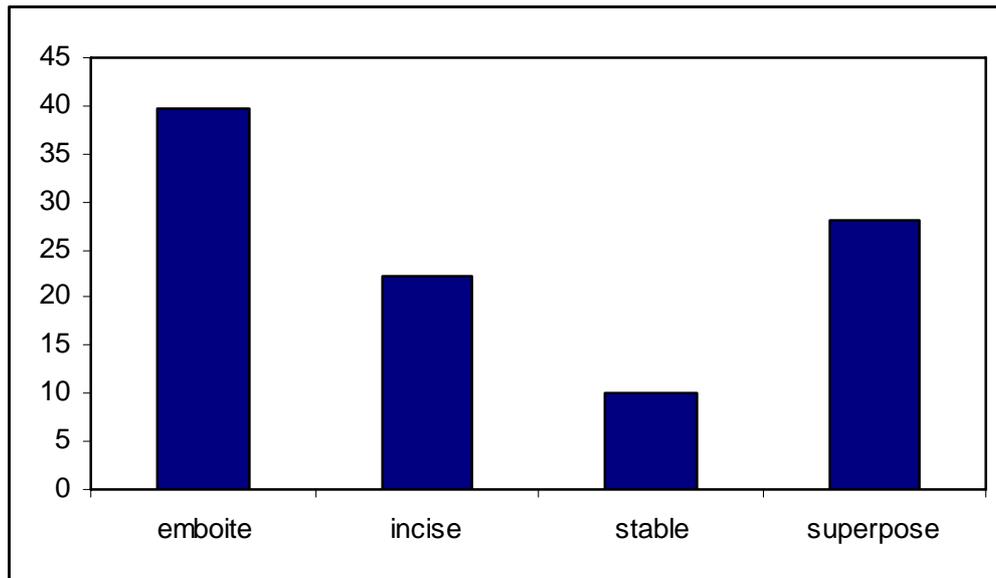


Figure 3.7 : Distribution des ZHR de niveau 2.

Pour les différents niveaux de la classification, les logiques de distribution des types dans le gradient amont – aval font principalement intervenir des facteurs internes dus à la dynamique fluviale ; en particulier (1) la pente du plancher alluvial héritée de la dernière période froide qui fournit l’énergie entrant dans le système et (2) l’évolution longitudinale dans le rapport débit liquide/débit solide (Gaillard, 1999). Localement, des facteurs externes interviennent tels que la lithologie et l’hydrogéologie ; ils rendent compte par exemple de la présence et/ou de l’absence de certains types de ZHR et de revêtements sédimentaires.

5. Etape de validation de l'indice fonctionnel pondéré

L'approche développée ci-dessus, conduisant à la définition d'indices de fonctionnalité des corridors fluviaux, est une approche *a priori*, basée sur l'identification de caractéristiques mesurables considérées en principe comme favorables à la réalisation des fonctionnalités attendues des zones humides riveraines, rétention des crues et élimination des nitrates.

Cette approche a le grand avantage de pouvoir s'appliquer à l'ensemble d'un territoire aussi vaste que celui du bassin Seine-Normandie dès lors que les bases de données descriptives nécessaires sont disponibles. Elle ne peut cependant être validée que dans la mesure où les fonctions concernées peuvent effectivement être mesurées de manière directe, au moins dans un certain nombre de situations particulières.

Dans cette partie, nous examinerons donc tout d'abord la question de la détermination directe des fonctionnalités des zones humides. Nous examinerons ensuite comment ces déterminations directes, là où elles sont possibles, permettent de valider ou non les indices fonctionnels définis dans la première partie de ce travail. Cette discussion portera principalement sur la fonction de rétention des nitrates, la fonction d'écrêtement des crues étant, comme nous le verrons, plus difficile à caractériser.

4.1. Fonction de rétention des nitrates

4.1.1. Détermination directe de la rétention riparienne des nitrates

4.1.1.1. La nature du processus de rétention riparienne des nitrates

Avant de rejoindre les cours d'eau, les eaux souterraines et de sub-surface issues du bassin versant, enrichies en nitrates par le lessivage des sols agricoles, transitent en général à travers les alluvions des zones humides riveraines. Ces alluvions, gorgées d'eau, souvent riches en matières organiques, peuvent être le siège d'un processus de dénitrification qui élimine sous forme gazeuse (N_2 , N_2O) une fraction importante des nitrates qui y parviennent (Figure 4.1).

Ce processus a été mis en évidence dans nombre d'études de sites. La Fig. 4.2., empruntée à une étude canadienne désormais classique (Hill et al., 2000), montre bien l'importance du processus de dénitrification qui, dans une plaine alluviale riche en dépôts tourbeux, élimine presque complètement les nitrates issus des plateaux agricoles adjacents.

La dénitrification riparienne se manifeste donc par des concentrations en nitrates dans les cours d'eau inférieures à celle des eaux souterraines du bassin versant qui les alimentent. De plus, une signature isotopique, consistant en un enrichissement en ^{15}N des nitrates du cours d'eau par rapport à ceux des eaux souterraines, apporte la confirmation que c'est bien un processus de dénitrification qui est responsable de cette diminution de concentration (Figure 4.3 ; Sebillio et al., 2003).

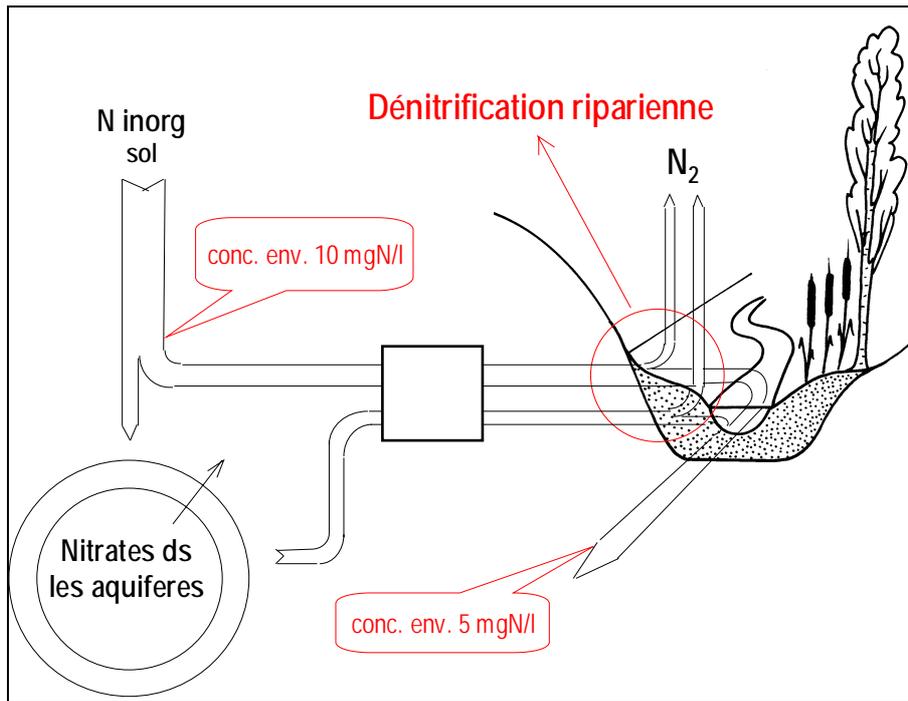


Figure 4.1. Schéma théorique du mécanisme de la dénitrification riparienne

Boyne River (Canada)
Hill et al, 2000

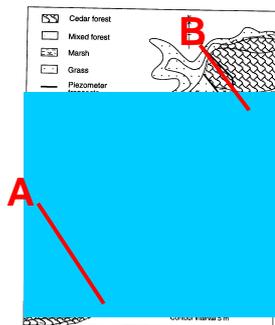


Figure 3. Boyne River floodplain and location of the sampling transects at the upstream and downstream sites.

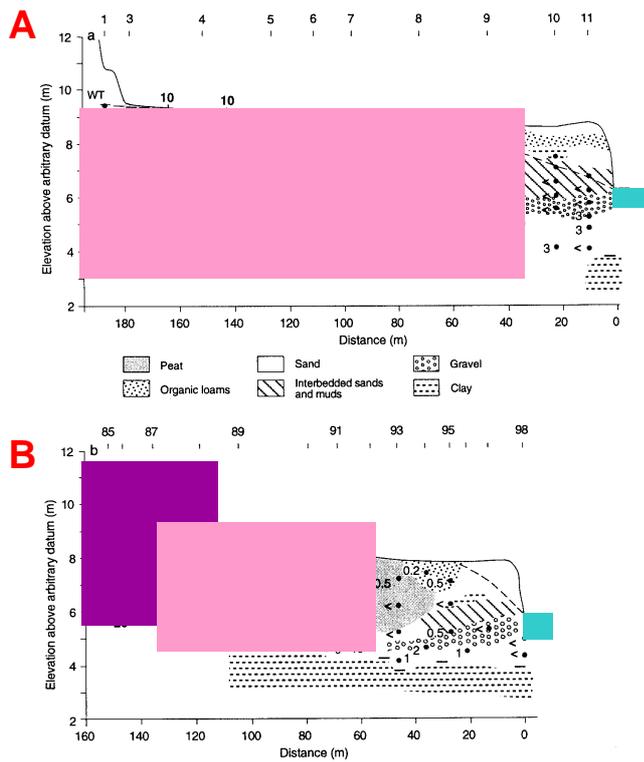


Figure 3. Groundwater $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations (mg L^{-1}) in late summer 1997 along (a) transect A and (b) transect B. < indicates $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations $< 0.1 \text{ mg L}^{-1}$. Lines are contours of equal nitrate concentration.

Figure 4.2. Un cas d'étude classique mettant en évidence expérimentalement la rétention riparienne dans la plaine alluviale d'une rivière agricole canadienne (Hill et al, 2000).

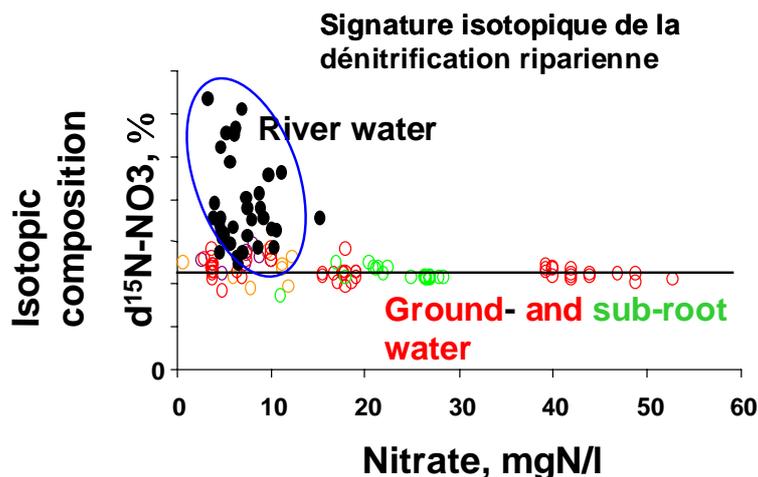


Figure 4.3. Manifestation de la dénitrification riparienne : les eaux de surface sont moins riches en nitrates et l'azote de ceux-ci enrichis en isotope lourd, par rapport aux eaux souterraines (phréatiques ou sous-racinaires) qui les alimentent. Cas du bassin du Grand Morin (Sébillou et al., 2003).

Notons enfin que la mise en place d'un réseau de drains agricoles, qui s'est fait de manière intensive dans certaines régions du bassin de la Seine au cours des années 1980, a abouti à court-circuiter les zones humides riveraines et donc à limiter très fortement leur potentiel de rétention des nitrates issus du bassin versant.

4.1.1.2. Calcul de la rétention riparienne des nitrates dans le bassin de la Seine

Compte tenu de ce qui vient d'être dit, il est possible d'évaluer l'importance de la dénitrification riparienne par comparaison des données de concentration en nitrate dans les eaux de surface avec celle des eaux souterraines de leur bassin d'alimentation. Nous nous sommes limités à des cours d'eau de taille relativement faible (<1000 km²) dans lesquels les apports diffus d'azote sont largement dominants par rapport aux apports ponctuels urbains. Nous nous sommes également limités à la période estivale d'étiage (juillet, août, septembre) durant laquelle les cours d'eau sont essentiellement alimentés par les aquifères, et au cours de laquelle l'intensité des processus de dénitrification est susceptible d'être maximale.

Nous avons utilisé, pour cette comparaison, 2 bases de données :

- (i) les données de qualité des eaux de surface du RNB
- (ii) les données de concentration des captages d'eau potable (disponibles pour les périodes 1992-1993 et 1997-1998) (RNDE), moyennées par zones hydrogéologiques homogènes.

La figure 4.4. montre les données de concentrations moyennes en nitrates dans les aquifères issues de cette dernière base pour les 2 périodes considérées. La comparaison des valeurs moyennes à ces deux périodes, montre l'évolution à la hausse de la contamination nitrique, qui représente un accroissement annuel d'un peu moins de 1 mgNO₃/l.

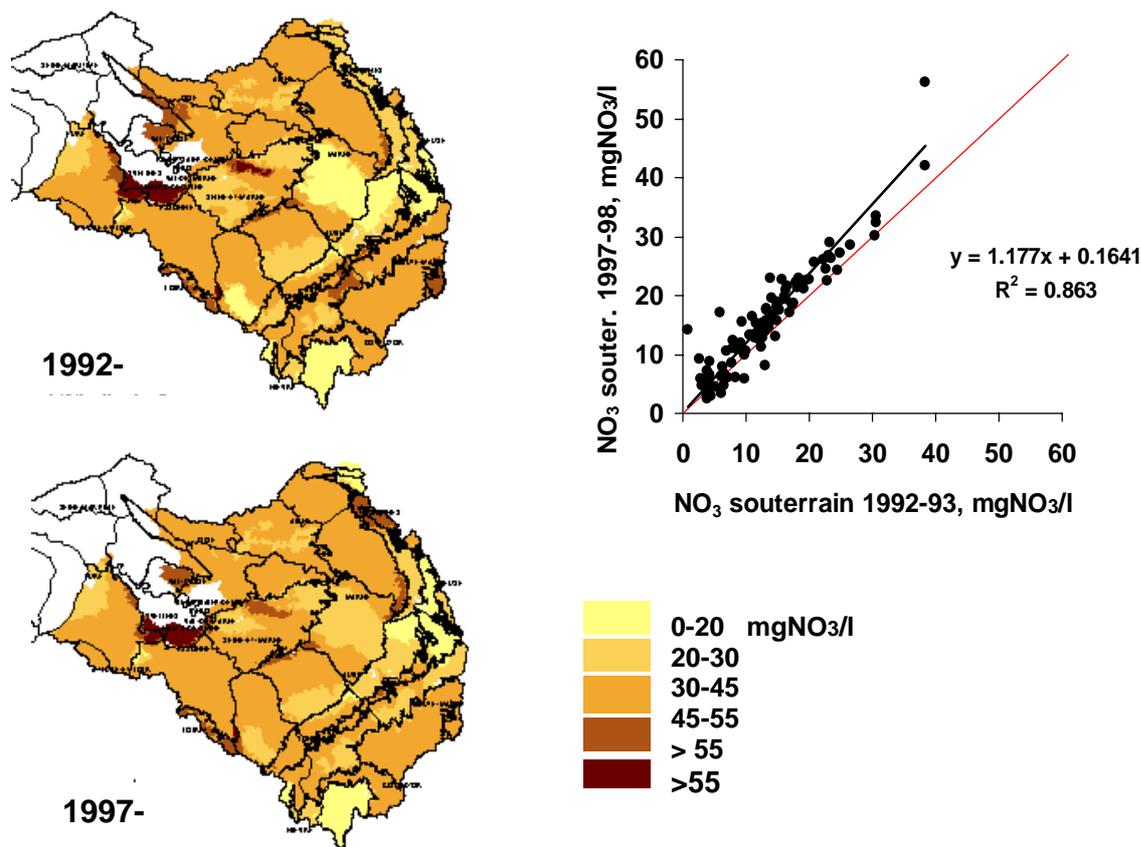


Figure 2.4. Teneurs moyennes par grandes unités hydrogéologiques des concentrations en nitrates des eaux souterraines en 1992-1993 et 1997-1998.

Le calcul de la rétention riparienne s'effectue en comparant les valeurs moyennes estivale de la concentration nitrique en chaque station de qualité des eaux de surface (C_s) avec la valeur moyenne de la concentration en nitrate dans les zones contributives amont du bassin versant (C_n) :

$$\text{Rétention} = 1 - C_s/C_n$$

Sur l'ensemble du bassin de la Seine, quelques 150 stations, correspondant à des bassins versant de moins de 1000 km², ont pu être retenues pour cette analyse (Figure 2.5.).

La rétention estimée de cette manière varie entre 4 % et 97 % sur l'ensemble des stations, avec une moyenne de 58 %. Cette valeur élevée montre l'importance du processus de dénitrification riparienne, confirmant ainsi les estimations réalisées précédemment par d'autres méthodes à l'échelle du bassin de la Seine (Billen et al., 2000, Sébillo et al., 2003),

La rétention a été estimée de façon indépendante sur les périodes 1992-1993 et 1997-1998. Les résultats sont tout à fait similaires. Dans la suite, c'est la valeur moyenne des 2 périodes qui sera utilisée.

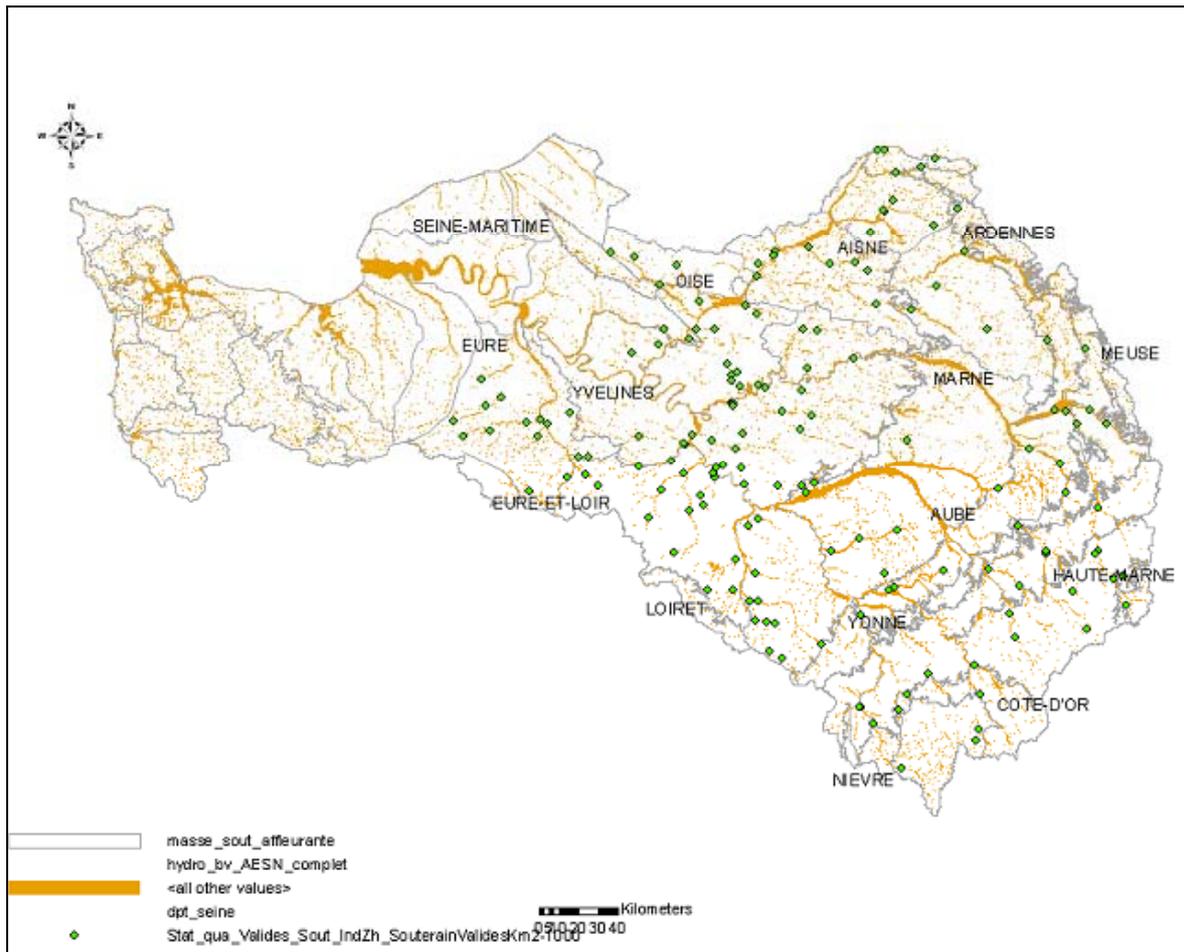


Figure 4.5. Stations retenues pour le calcul de la rétention riparienne à partir des mesures de concentrations nitriques dans les eaux de surface et les eaux souterraines.

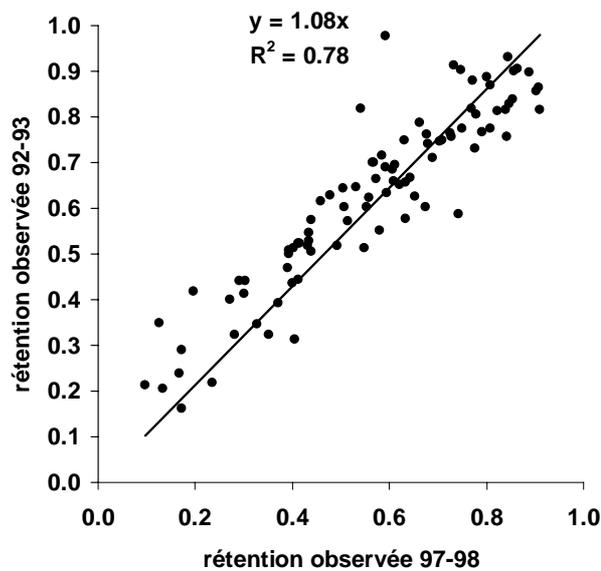


Figure 4.6. Comparaison de l'estimation de la rétention riparienne des nitrates à partir des jeux de données des périodes 1992-1993 et 1997-1998.

4.1.2. Comparaison avec les indices typologiques

2.1.2.1. Potentiel de rétention des classes géomorphologiques de corridor fluviaux.

La typologie géomorphologique de S. Gaillard, qui a pu être appliquée à l'ensemble du territoire Seine-Normandie, permet de classer les corridors fluviaux selon des critères liés à l'histoire de la mise en place de leur remplissage alluvionnaire. A priori, les classes géomorphologiques ainsi définies ont une certaine pertinence par rapport au fonctionnement biogéochimique de ces corridors. Ainsi on peut s'attendre à ce qu'un corridor incisé dans la roche en place, sans revêtement alluvionnaire, soit moins efficace en terme de rétention des nitrates, qu'un corridor du type emboîté, particulièrement si son remplissage alluvionnaire comporte des dépôts organiques.

Partant de cette idée, nous avons comparé les estimations de rétention riparienne (R) réalisée par la méthode de bilan exposée ci-dessus, avec la répartition $\{cl(i)\}$ des corridors fluviaux du réseau hydrographique amont de chacune des stations dans les différentes classes géomorphologiques (i).

La méthode consiste à affecter à chaque classe typologique (i) une valeur $a(i)$ de potentiel de rétention des nitrates.

Un estimateur de la rétention intégrée à la station considérée est alors donné par

$$\text{Est}(R = \sum cl(i) * a(i))$$

Pour prendre en compte l'effet du drainage agricole (exprimé en % de surface équipée de drains), un facteur $(1 - dr * \% \text{ drainage})$, représentant la fraction des corridors fluviaux court-circuités par les réseaux de drains, est ajouté à l'estimateur :

$$\text{Est}(R = [\sum cl(i) * a(i)] * (1 - dr. \% \text{ drainage}))$$

En optimisant les valeurs de $a(i)$ pour les classes géomorphologiques sur la base de leur capacité à prédire les valeurs observées de la rétention R, on aboutit aux estimations suivantes du potentiel de rétention des principales classes géomorphologiques :

Emboîté à revêtement organique/mixte	90 %
Emboîté à revêtement minéral	50 %
Superposé à revêtement mixte/organique	60 %
Superposé à revêtement minéral	60 %
Incisé à revêtement holocène	75 %
Incisé sans revêtement	20 %
Stable	10 %

Conformément à ce qu'on pouvait attendre, les corridors fluviaux de type stable et incisé dans la roche en place sans revêtement alluvionnaire sont les moins efficaces en terme de rétention des nitrates. Les autres classes sont toutes efficaces à plus de 50%.

Notons cependant que l'estimateur de rétention obtenu par cette procédure d'optimisation est loin d'offrir une très bonne concordance avec les valeurs mesurées de rétention, comme le montre la figure 4.7. Clairement, d'autres facteurs de variabilité que le drainage et l'appartenance des corridors aux classes géomorphologiques interviennent dans la rétention riparienne.

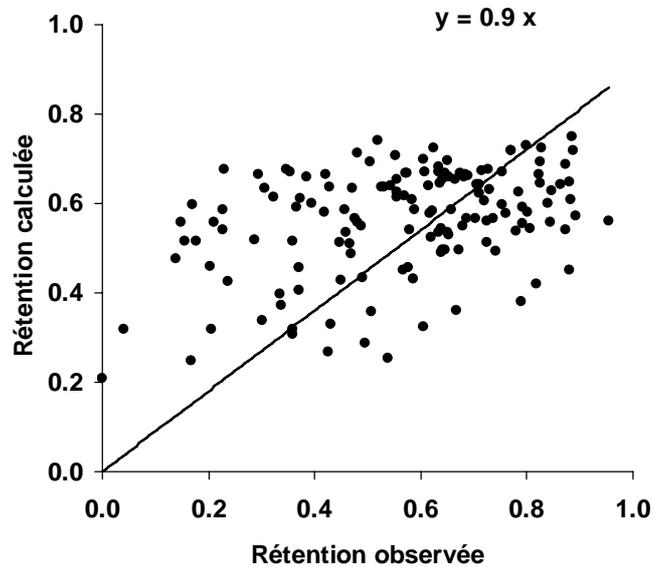


Figure 4.7. Comparaison de la valeur de l'estimateur de rétention riparienne calculé à partir du drainage et du potentiel de chaque classe géomorphologique avec la rétention observée.

2.1.2.2. Indices de fonctionnalité

Les valeurs de taux de rétention des nitrates déduite de l'analyse décrite au § 4.1.1.2 peuvent aussi être comparés à l'indice calculé par notation a priori à partir des indicateurs caractérisant les corridors fluviaux du réseau hydrographique amont, selon une démarche analogue avec celle décrite ci-dessus pour la typologie géomorphologique.

Si l'on compare les rétentions calculées à la moyenne de l'indice calculé sur les 11 critères retenus par E. Joyeux, aucune corrélation significative n'est observée (Figure 4.8). Il en va de même pour les corrélations avec chacun des indicateurs constitutifs de l'indice pris isolément.

Une procédure d'optimisation, semblable à celle utilisée pour définir les potentiels de rétention des classes géomorphologiques de corridors fluviaux, permet de mettre en évidence le poids prépondérant des indices suivants dans un indicateur de rétention construit sur les 11 critères retenus dans l'approche d'E. Joyeux :

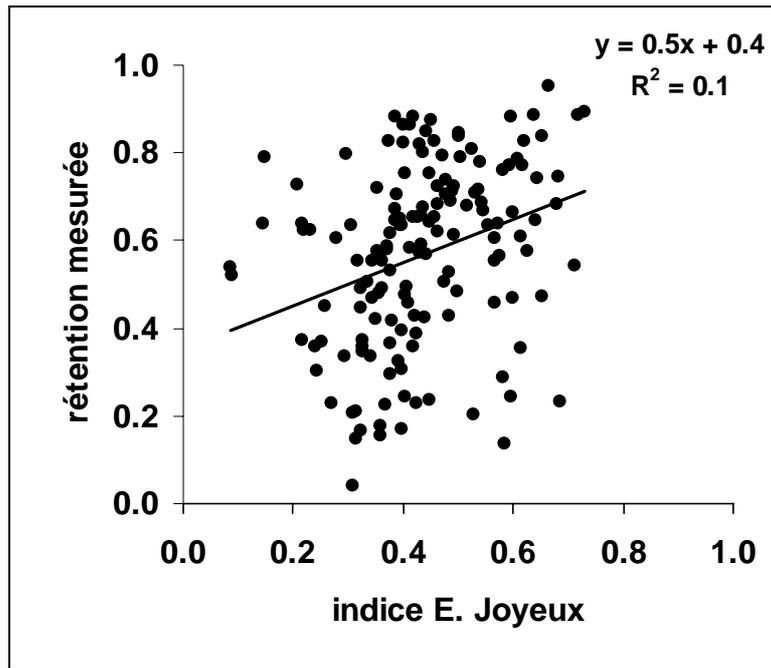


Figure 4.8. Comparaison de la valeur de l'indice fonctionnel a priori proposé par E. Joyeux avec la valeur observée de la rétention riparienne.

Présence de chenaux secondaires	0.9
Type de végétation	0.6
Présence de gravières en eau	0.3
Largeur	0.1
Revêtement	0.1

Trois de ces critères (chenaux, gravières, largeur) mettent en avant les grandes zones alluviales, par opposition aux petits corridors de têtes de bassin. Le type de végétation (permanente ou non) apparaît aussi comme un critère important dans la fonction de rétention des nitrates.

Ici encore toutefois, ces 5 critères sont insuffisants pour expliquer toute la variabilité des valeurs mesurées de rétention riparienne.

4.2. Fonction d'écrêtement des crues

4.2.1. Détermination directe du stockage hydrologique

4.2.1.1. La nature du processus de stockage hydrologique

Lors du passage d'une crue à travers un corridor fluvial, les possibilités de stockage d'eau dans les alluvions et les annexes hydrauliques de la plaine d'inondation permettent de retarder et d'étaler le pic de débit. La crue passée, les volumes stockés sont restitués, contribuant à soutenir les débits (Figure 2.9).

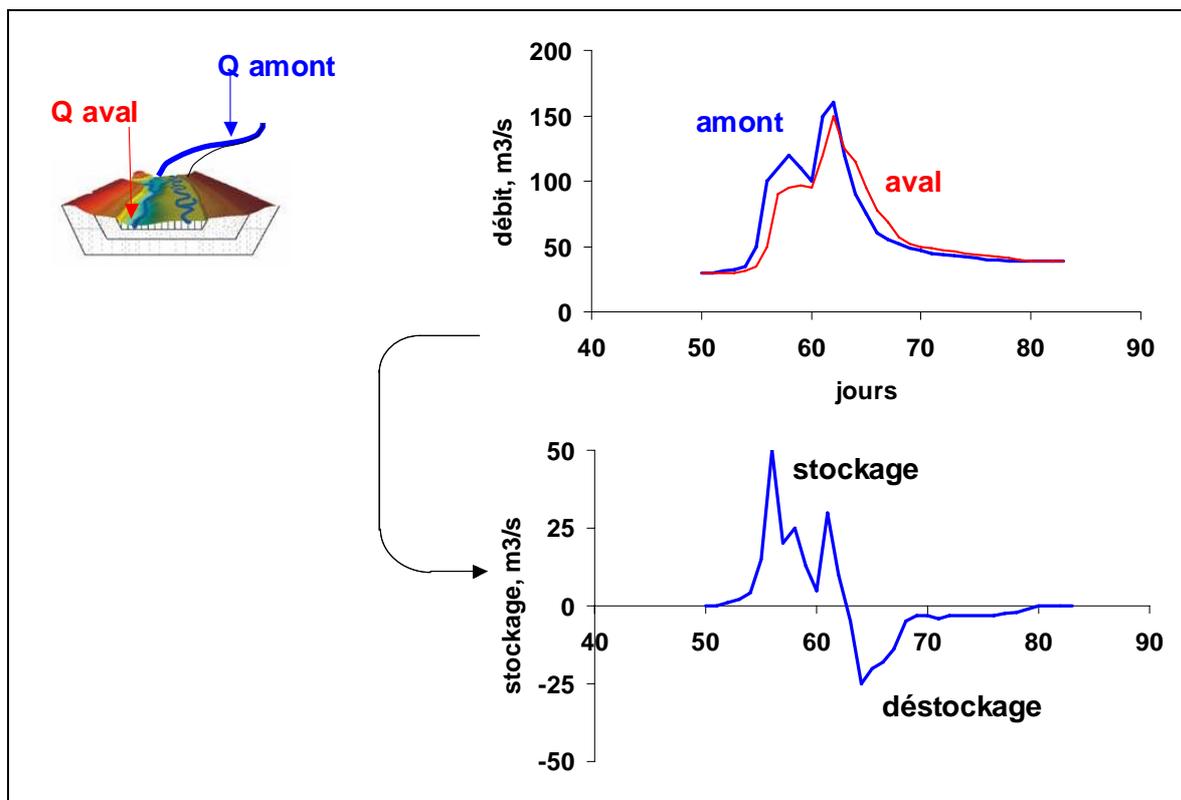


Figure 4.9. Schéma théorique du mécanisme d'écrêtement des crues.

4.1.1.2. Calcul de la rétention hydrologique en divers sites du bassin de la Seine

Edith Joyeux a répertorié une dizaine de sites pour lesquels les données de débits disponibles dans la Banque Hydro permettent la mise en évidence et la quantification du processus de stockage-déstockage hydrologique dans les corridors fluviaux. Le Tableau 4.1. récapitule les estimations disponibles, exprimées en % de débit amont stocké par km de surface de corridor fluvial concerné.

Tableau 4.1. Corridors fluviaux délimités par une ou plusieurs stations hydrologiques amont et aval, permettant le calcul de la rétention hydrologique (voir E. Joyeux, 2005).

rivière	stations amont	station aval	Surface (km²)	Stockage (%/km²)
Aube	Rennepont + Longchamp-sur-Aujon	Bar-sur-Aube	7.3	0.32
Aube	Bar-sur-Aube	Blaincourt-sur-Aube	10.6	2.12
Seine	Troyes*	Méry-sur-Seine*	43	0.16
Ouanne	Charny	Gy-les-Nonains	14.6	0.44
Oise	Hirson + Origny-en-Thiérache	Monceau-sur-Oise	15.1	1.13
Oise	Monceau-sur-Oise	Origny-Sainte-Benoite	18.3	0.89
Oise	Origny-Sainte-Benoite	Condren	59.3	0.04
Oise	Condren	Sempigny	46.3	0.28
Serre	Mortiers	Nouvion-et-Catillon	17	0.18
Aillette	Colligis-Crandelain	Chavignon	3.1	7.87
Aisne	Berry-au-Bac	Pontavert	2.5	2.00
Thérain	Beauvais	Maysel	31.6	0.06

Ces estimations, qui devraient être reprises avec une analyse plus détaillée des processus impliqués, montrent dès à présent une rétention très variable, allant de 0 à 7% du débit amont par km² de corridor fluvial.

4.2.2. Comparaison avec les indices typologiques

Les situations ayant pu faire l'objet d'une analyse hydrologique sont à ce jour trop peu nombreuses pour que des conclusions fermes puissent être tirées de leur confrontation avec les différents indices caractérisant les corridors fluviaux concernés.

Aucune relation significative n'apparaît en comparant le stockage avec l'indice 'crue' d'E. Joyeux.

La comparaison avec la répartition des différentes classes géomorphologiques dans les corridors concernés ne fait apparaître que les ordres de grandeurs suivants de capacité de stockage hydrologique pour ces classes :

Emboîté à revêtement organique/mixte	8 % /km ²
Emboîté à revêtement minéral	1 %/km ²
Superposé à revêtement mixte/organique	4 %/km ²
Superposé à revêtement minéral	1 %/km ²
Stable	1 %/km ²
Incisé	0

5. Conclusion générale

Ce travail a permis d'ouvrir la voie à la valorisation de l'important travail de constitution d'une base de données détaillées des caractéristiques des zones humides riveraines à l'échelle du district Seine-Normandie.

5.1. Elaboration d'une interface pour l'automatisation des calculs d'indice

Une interface a été élaborée, qui permet d'interroger cette base et de construire des indices synthétiques pondérant les différents indicateurs intervenant dans les fonctionnalités des zones humides riveraines, de calculer ces indices dans un territoire donné, et d'en fournir une représentation cartographique et une analyse statistique.

Des modifications ont été proposées pour la définition des indicateurs et le calcul des indices. Certaines de ces modifications peuvent affecter considérablement l'indice résultant, de sorte que le caractère quelque peu arbitraire de ces classifications doit être gardé à l'esprit.

5.2. Etablissement de la typologie géomorphologique

La base a été utilisée par ailleurs pour établir, sur l'ensemble du district Seine-Normandie, une typologie géomorphologique rendant compte des conditions de mise en place du remplissage alluvionnaire des corridors fluviaux, qui déterminent nombre des fonctionnalités actuelles de ces corridors.

5.3. Evaluation directe des fonctionnalités des zones humides riveraines

Un important travail a été réalisé pour évaluer l'importance quantitative de la rétention des nitrates effectuée par les corridors fluviaux à l'échelle du district Seine-Normandie. Très variable (de 4 à 98%) selon les secteurs, cette rétention s'élève cependant en moyenne à 58% en conditions estivale.

L'estimation directe de la fonction de rétention hydraulique est moins avancée, mais confirme le rôle bénéfique des zones humides riveraines en terme de régulation des crues.

5.4. Validation des indices et de la typologie géomorphologique

La comparaison des estimations de rétention des nitrates, là où elle est possible (c-à-d sur env. 150 ensembles de corridors) avec les indices définis a priori sur tous les indicateurs disponibles, ou avec la typologie géomorphologique, en vue d'une validation de ces indices ou de cette typologie est relativement décevante, la variabilité des estimations de rétention ne pouvant être tout entière expliquée par les indicateurs retenus.

On retiendra cependant les conclusions suivantes :

* Parmi les classes de la typologie géomorphologique, les types emboîtés et superposés, mais également les types incisés avec revêtement holocène, très représentés dans les têtes de bassin, sont les plus efficaces en terme de rétention des nitrates. Les types stables et incisés dans la roche en place sans revêtement alluvionnaire sont beaucoup moins efficaces.

* Parmi les indicateurs disponibles dans la base de données générale, cinq semblent significatifs en terme de pouvoir de rétention des nitrates:
La présence de chenaux secondaires, de gravières en eau, la nature du revêtement alluvionnaire, la largeur du corridor fluvial, le type de végétation.

Il n'est pas possible, dans l'état actuel de ces travaux, d'aller plus loin dans l'évaluation et la hiérarchisation des fonctionnalités des zones humides riveraines du district Seine-Normandie. Nous sommes conscients que cela peut être insuffisant pour identifier à coup sûr les secteurs où des actions de protection ou d'aménagement pourraient être les plus efficaces.

Pour valoriser au mieux le travail réalisé, et à titre d'exemple de ce à quoi la démarche, encore exploratoire à ce stade, peut aboutir, nous avons représenté géographiquement en Fig. 5.1. la distribution d'un indice bâti seulement sur les 5 critères identifiés comme les plus pertinents par la comparaison avec la mesure directe de la rétention des nitrates. (présence de chenaux secondaires, de gravières en eau, nature du revêtement alluvionnaire, largeur du corridor fluvial, type de végétation).

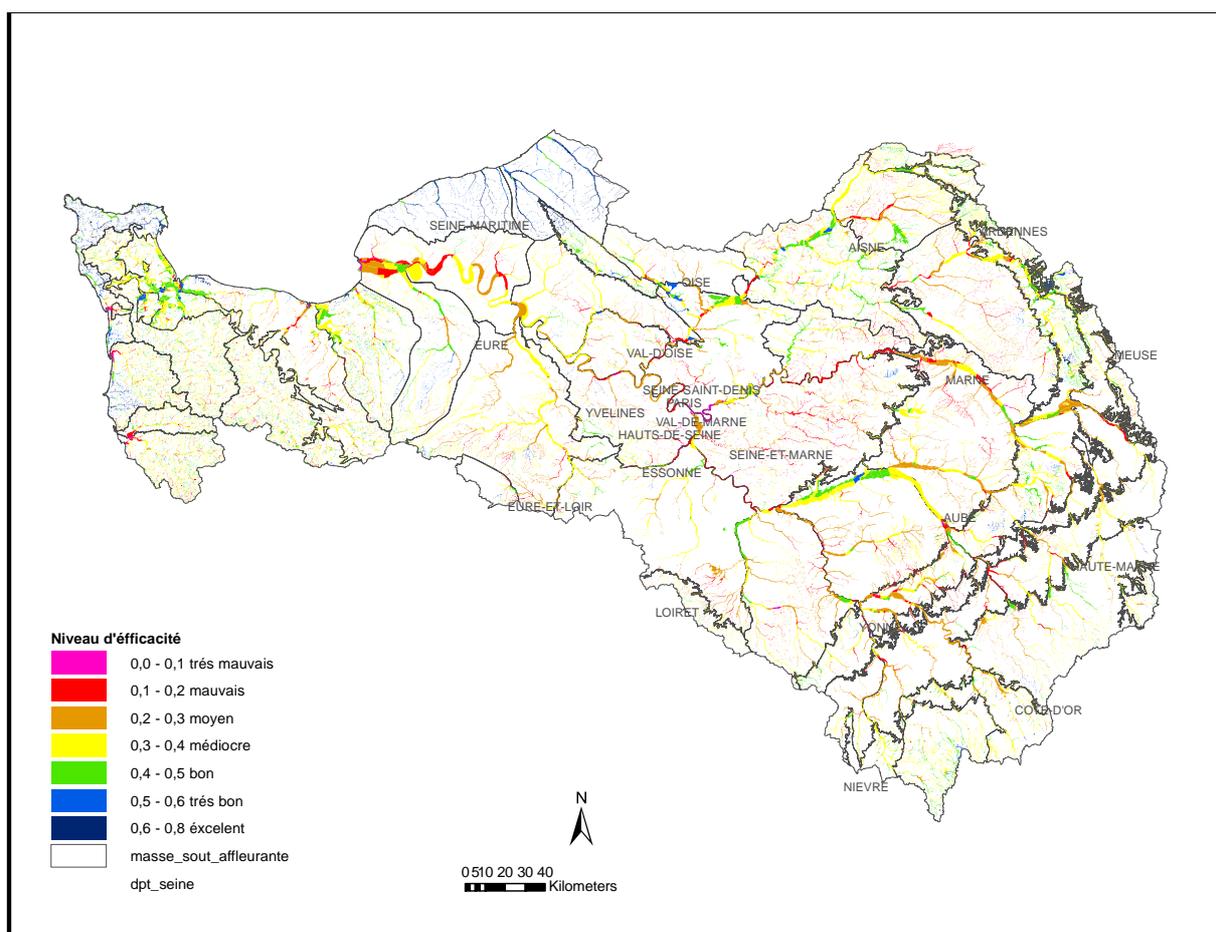


Figure 5.1. Indice calculé à partir des 5 indicateurs retenus par comparaison avec la mesure de la rétention des nitrates (chenaux secondaires, Type de végétation, gravières en eau, Largeur, Revêtement)

L'indice est défini par la relation suivante :

$$\text{Indice ZHR} = (\text{chenaux secondaires} * 0.9 + \text{Type de végétation} * 0.6 + \text{gravières en eau} * 0.3 + \text{Largeur} * 0.1 + \text{Revêtement} * 0.1) / 2$$

La répartition des classes ainsi définie dans l'ensemble du district Seine Normandie est représentée dans la figure 5.2.

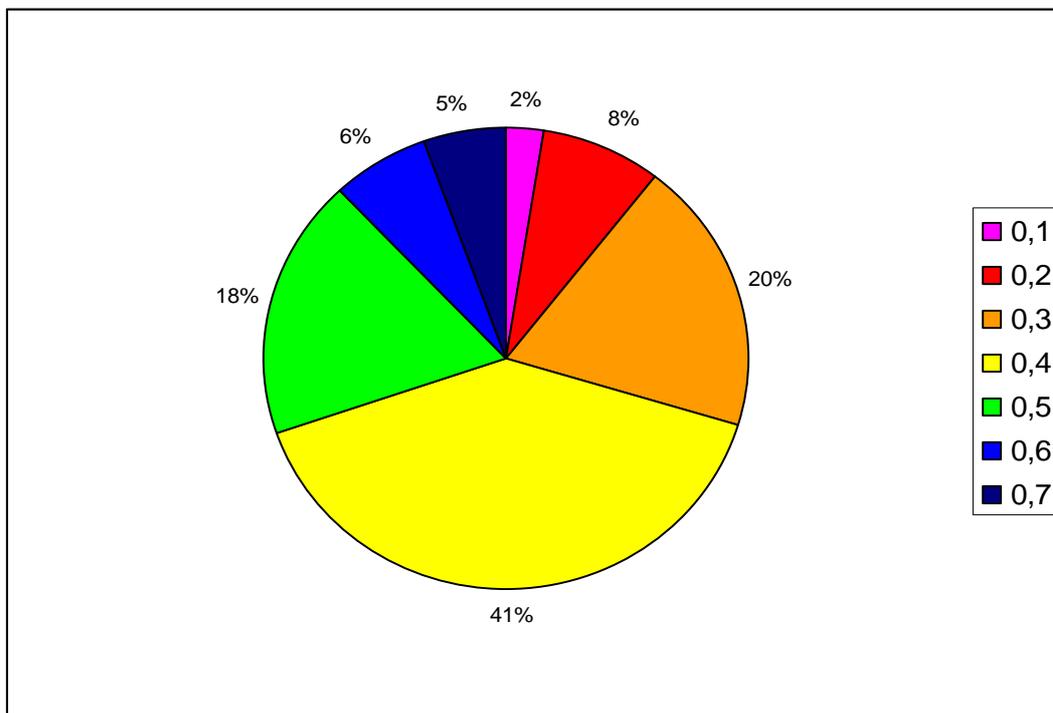


Figure 5.2. Distribution des effectifs de l'indice calculé à partir des 5 critères pondérés

Avec la même définition d'indice, il est possible de représenter la répartition des zones humides riveraines en 3 niveaux (Figure 5.3), ce qui fait mieux ressortir les secteurs les plus intéressants selon cet indice.

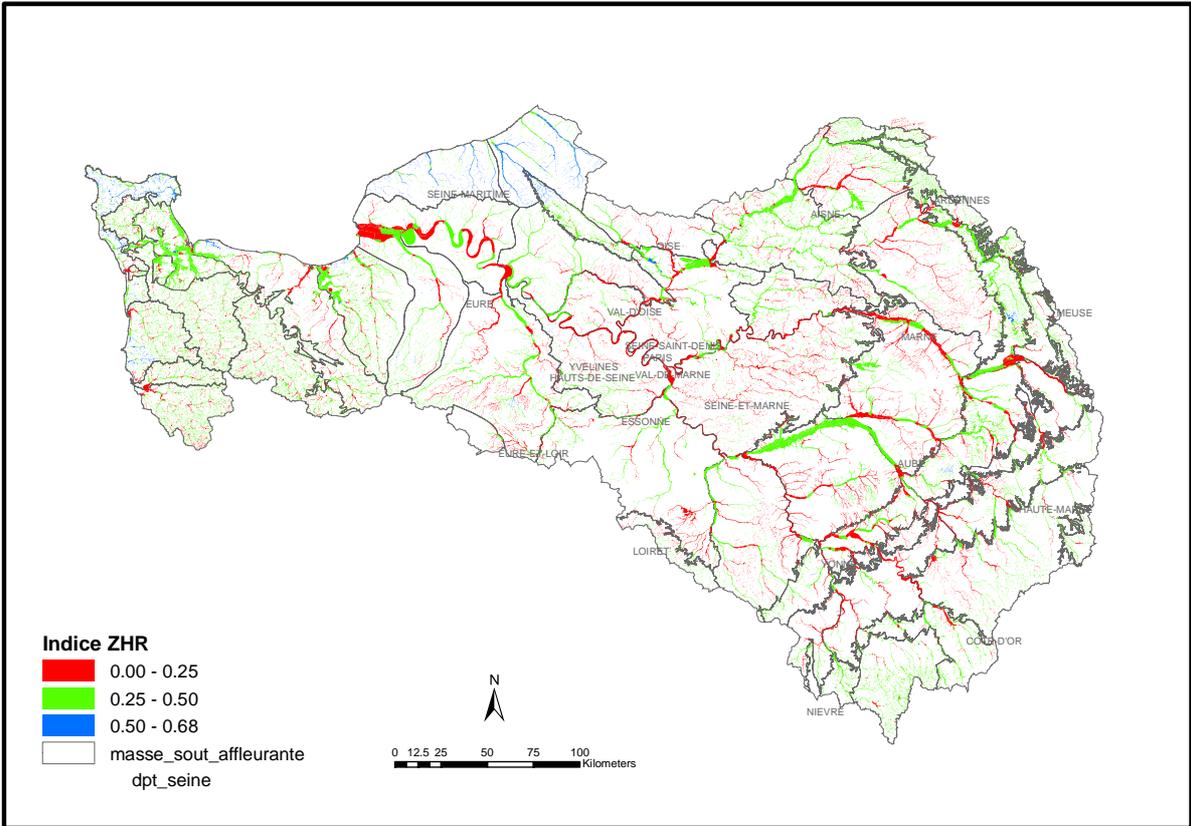


Figure 5.3. Indice calculé à partir des 5 critères classés en trois niveaux

Annexe : Notice utilisateur résumée de l'interface

L'interface proposée a été conçue pour un objectif précis : automatiser les calculs des indicateurs et de l'indice des zones humides riveraines. Ces calculs sont basés principalement sur des opérations géométriques entre différentes bases de données géomorphologiques. Cette interface a été programmée en langage VBA sur logiciel SIG d'Esri ARGIS 9.0

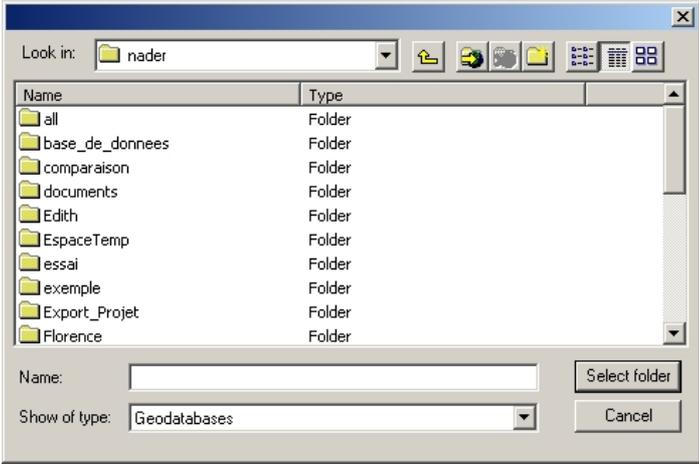
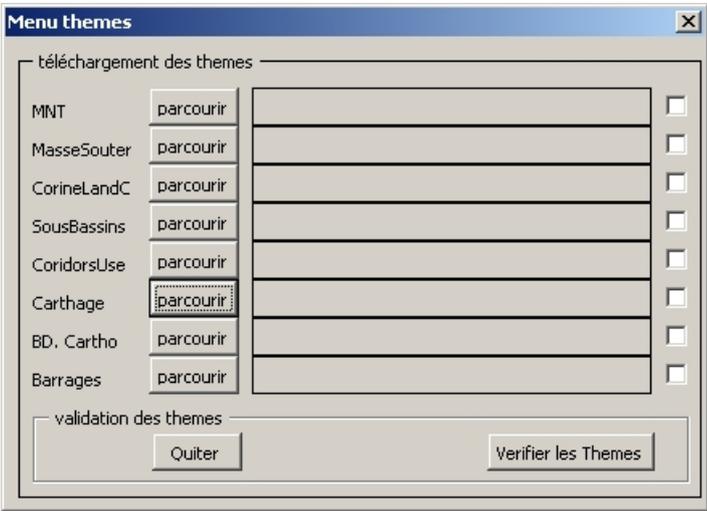
Bien que l'interface soit générique, son fonctionnement est conditionné par la présence des couches et des champs précis. L'absence de ces champs empêche donc le fonctionnement de l'interface. Pour cela nous avons intégré dans l'interface une procédure de vérification des couches et des champs.

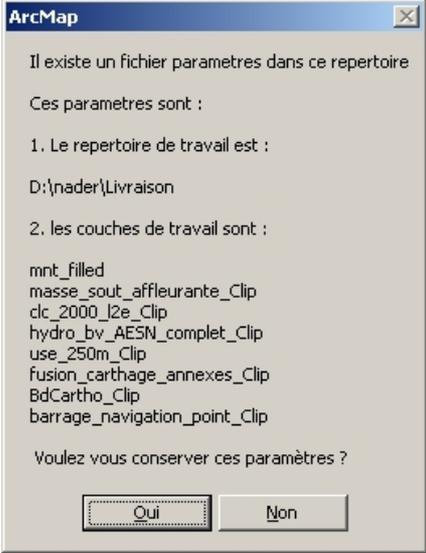
Étant donné la taille des bases employées les calculs sont longs et peuvent s'opérer en plusieurs étapes. Pour éviter de refaire certaines opérations, nous avons intégré des procédures de vérification des calculs antérieurs. Cela est facilité par l'intégration des fichiers paramètres qui enregistrent les étapes antérieures à chaque fois que l'interface est lancée. Les procédures de lecture des fichiers paramètres sont intégrées dans le bouton principal du lancement de l'interface « Menu Zones Humides ».

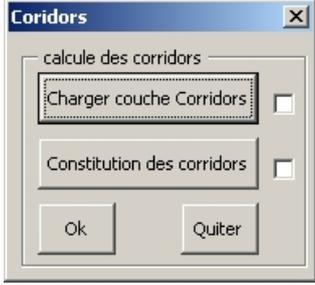
L'utilisation de l'interface permet de procéder en plusieurs étapes, les tableaux ci-dessous illustrent ces étapes dans l'ordre logique d'une session de calcul d'indice.

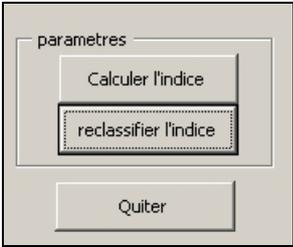
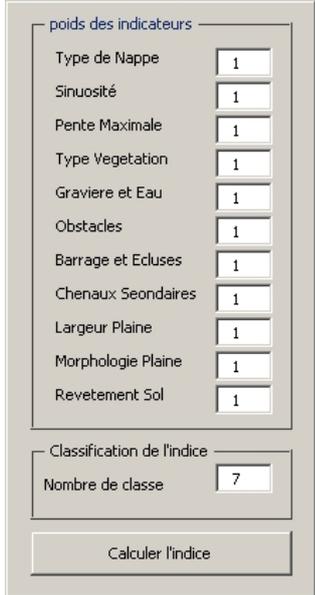
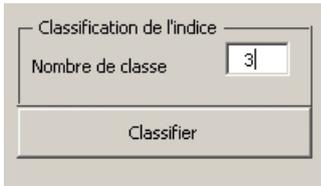
Le lancement de l'interface se réalise par un bouton intégré dans le menu principal d'arcGis.

Lors du lancement de ce bouton, l'utilisateur a accès à un explorateur qui lui permet de localiser son répertoire de travail. Ce répertoire doit être unique et invariant durant toutes les étapes de calcul. Il doit aussi contenir les couches initiales servant aux calculs. Ce répertoire contient les couches intermédiaires et finales produites durant les calculs. Il contient aussi les fichiers paramètres qui seront lu par l'interface.

étape	interfaces	explication
<p>1</p> <p>2</p> <p>3</p> <p>4</p>	   	<p>Bouton de lancement de l'interface.</p> <p>Interface de localisation du répertoire de travail. Elle permet de lancer un explorateur pour indiquer l'emplacement de ce répertoire. Celui-ci, sera le lieu d'enregistrement des fichiers paramètres et des couches de calcul des indicateurs.</p> <p>Ce menu, permet de charger les couches correspondant aux bons thèmes. Il permet aussi de vérifier si les couches chargées contiennent les champs nécessaires aux calculs. Si la couche ne contient pas les bons champs, elle ne sera pas chargée et un message sera affiché pour demander à l'utilisateur de réessayer. Si tous les thèmes sont correctement chargés le bouton vérifier thème enregistre dans le répertoire de travail les noms des ces couches dans un fichier paramètres. Cette étape permet de ne pas répéter le chargement des couches si la manipulation a été arrêtée et reprise ultérieurement.</p>
étape	interfaces	explication

5		<p>Si les couches ont déjà été chargées dans un répertoire de travail, lors du lancement de l'interface, les fichiers paramètres sont lus et le message, à gauche est affiché. Si l'utilisateur décide de conserver ces couches, il passera directement au menu des Corridors. Sinon, il devra recharger les couches de travail et remplacer les couches affichées par d'autres. Cela permet de mettre à jour les fichiers paramètres.</p>
6		<p>Après avoir chargé les couches de travail, l'étape suivante permet de revenir au menu principal.</p>
7		<p>A cette étape, le menu de sélection des thèmes est bloqué et le reste des menus est désactivé. Seul le bouton de lancement du menu des corridors est actif. En cliquant sur ce bouton l'utilisateur lance ce menu.</p>
8		<p>Si la couche des corridors a déjà été constituée dans le répertoire de travail. Le message, de gauche, apparaît à l'utilisateur pour le prévenir</p>

9		<p>Après le message précédent, le menu de corridors apparaît. Le bouton de haut permet de charger la couche de corridors, si elle existe, et de vérifier ses champs.</p> <p>Le bouton « constitution des corridors permet de lancer les opérations géométriques pour la constitution de cette couche.</p>
10		<p>Après le chargement des corridors, le menu principal ré-apparaît. Les deux premiers boutons, de sélection de thème et des corridors, sont bloqués.</p> <p>Le reste des boutons est actif. Cela permet de lancer le menu de calcul des indicateurs par le bouton « calcul des indicateurs. Si le calcul des indicateurs est déjà effectué, l'utilisateur peut passer directement au calcul de l'indice.</p>
11	 <div data-bbox="279 1803 957 1928" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px;"> <p>Cet indicateur a déjà été calculé dans le Champ 'IdTypNap' de la couche : Corridors</p> <p style="text-align: center;">OK</p> </div>	<p>Le menu de gauche, contient les boutons de calcul des critères. C'est là que toutes les opérations de calculs entre les couches se réalisent. Chacun des calculs peut durer plusieurs heures (si le calcul se fait sur toute la base.</p> <p>Le résultat de chaque critère est sous forme d'une couche qui porte le nom du critère mais ce critère est affecté à la couche des corridors sous forme d'un champ. Les couches intermédiaires de calculs sont enregistrées dans le répertoire de travail.</p> <p>Si le critère a déjà été calculé, un message prévient l'utilisateur en lui indiquant son emplacement.</p>

étape	interface	explication
12		<p>Ce menu est lancé à partir du menu principal, après les calculs des critères. Il permet de calculer l'indice ou de le recalculer.</p> <p>En cliquant sur le bouton calcul de l'indice, l'interface 13 apparaît.</p>
13		<p>Cette interface permet de créer un nouveau champ à la couche des corridors et de calculer l'indice.</p> <p>L'utilisateur peut choisir la pondération à affecter à chaque critère.</p> <p>Les valeurs par défaut sont à 1.</p>
14		<p>Dans la partie « classification de l'indice » de cette interface, l'utilisateur peut choisir le nombre de classes à</p> <p>Si l'indice est déjà calculé, l'utilisateur peut le reclassifier selon son besoin.</p>

Fichier de sortie :

L'ensemble des calculs aboutit à la couche « corridors » ayant les champs suivants.

Couche Corridors	
ID_BV	identifiant
Sum_NvSurf	surface du corridor
Ave_LargPo	Largeur pondérée du corridor
Sum_SPObj1	Somme des surfaces des extensions des revêtements minéraux (m2)
Sum_SPObj_2	Somme des surfaces des Extensions des revêtements organiques (m2)
Sum_SPObj_3	Somme des surfaces des Extensions du substratum (m2)
Sum_SPObj_4	Somme des surfaces des Extensions des mélanges alluvions/colluvions (m2)
Sum_MORPHO	Somme des longueurs du type morphologique 1
Sum_MORP_1	Somme des longueurs du type morphologique 2
Sum_MORP_2	Somme des longueurs du type morphologique 3
IdCor_Bv	Identifiant du corridor
IdTypNap	Indicateur « Type de nappe »
IdLargPl	Indicateur « Largeur de la plaine alluviale »
IdSinuos	Indicateur « Sinuosité »
IdPMax	Indicateur « Pente maximale »
IdTypVeg	Indicateur « Type de végétation »
IdGraEau	Indicateur « Gravières et eau »
IdObstac	Indicateur « Obstacles »
IdBarEcl	Indicateur « Barrage et écluses »
IdCheCon	Indicateur « chenaux secondaires et connexions »
IdMorPla	Indicateur « morphologie de la plaine alluviale »
IdRevSol	Indicateur « revêtement du sol »
IndiceZHR	Indice de Zones Humides Riveraine

Récapitulatif des principales cartes du rapport

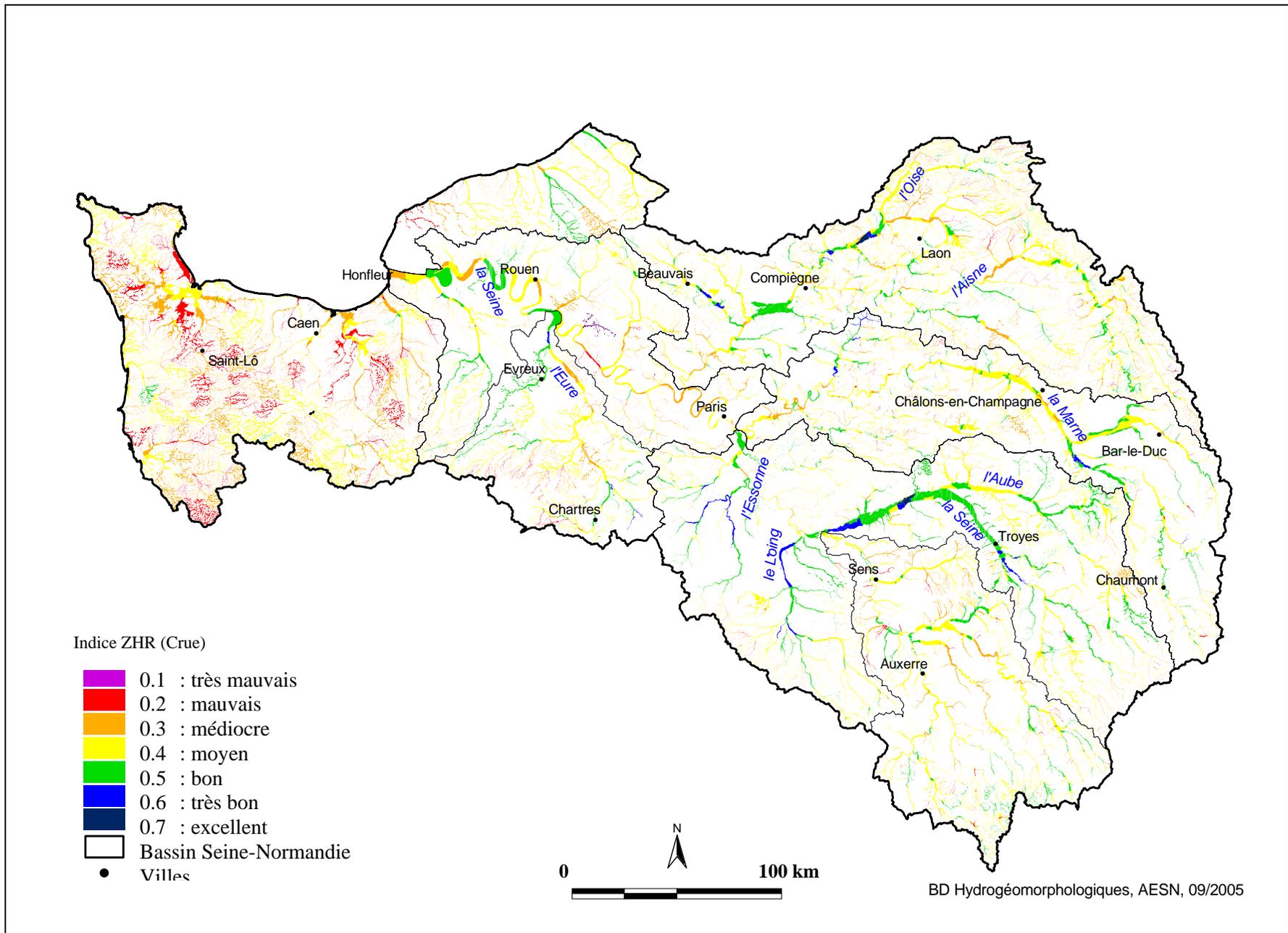


Figure 1. Carte de l'indice calculé selon la méthode E. Joyeux.

Zones Humides Fonctionnelles (Indice de crue)

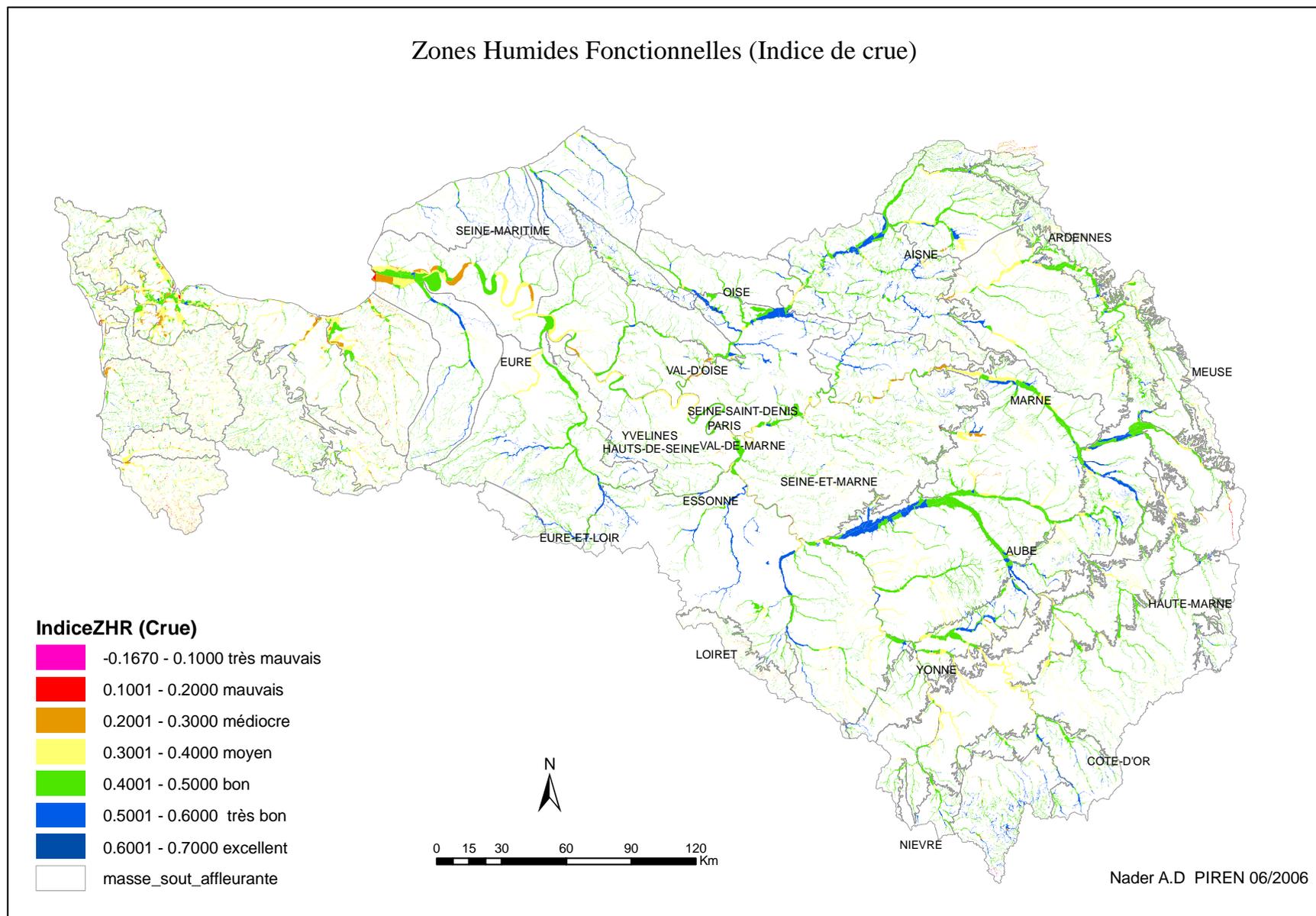


Figure 2. Carte de l'indice calculé avec pondérations des surfaces et poids des indicateurs = 1

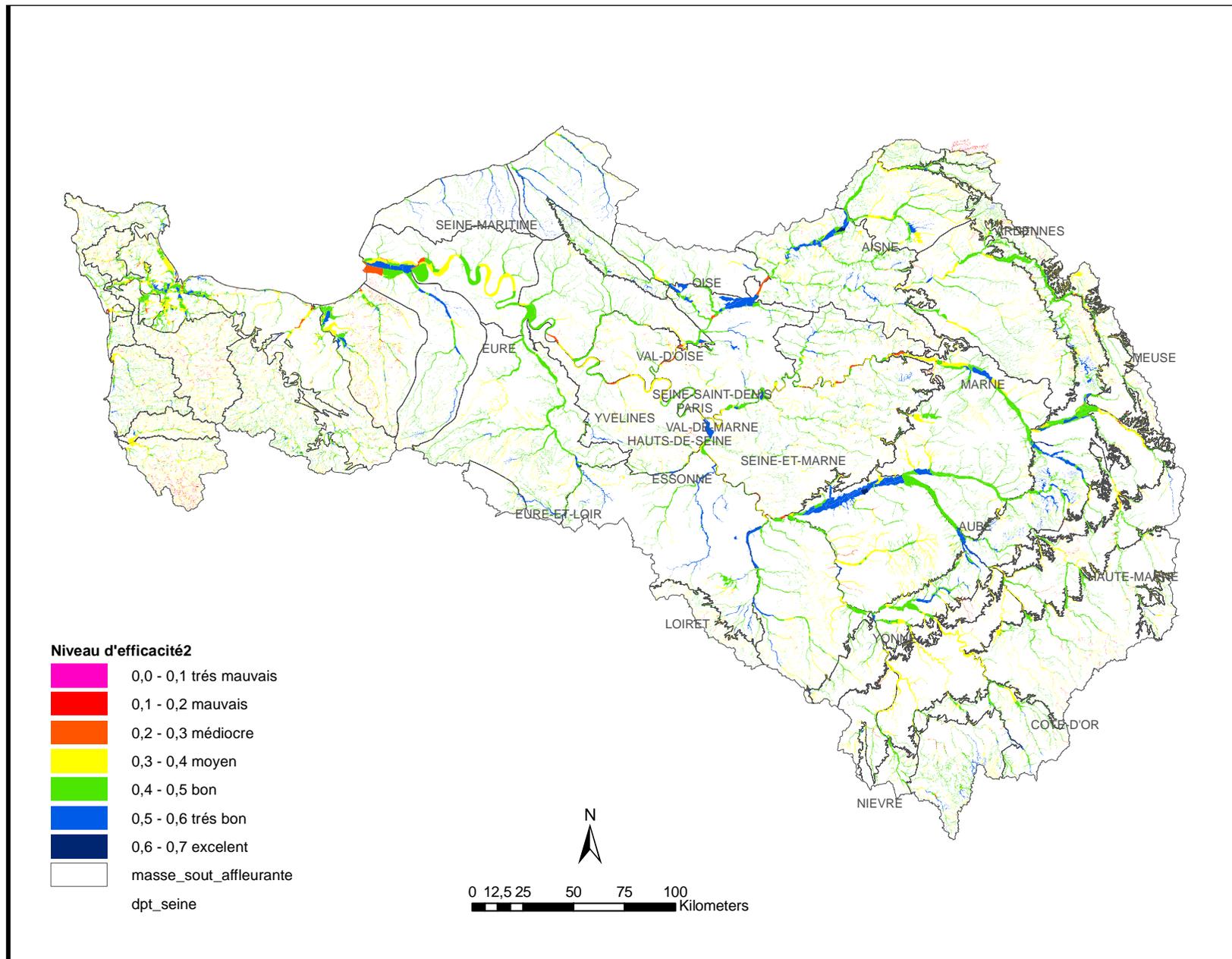


Figure 3. Carte de l'indice des zones humides riveraines après la modification du codage des critères largeur de la plaine, pente maximale et type de végétation, selon la méthode de normalisation.

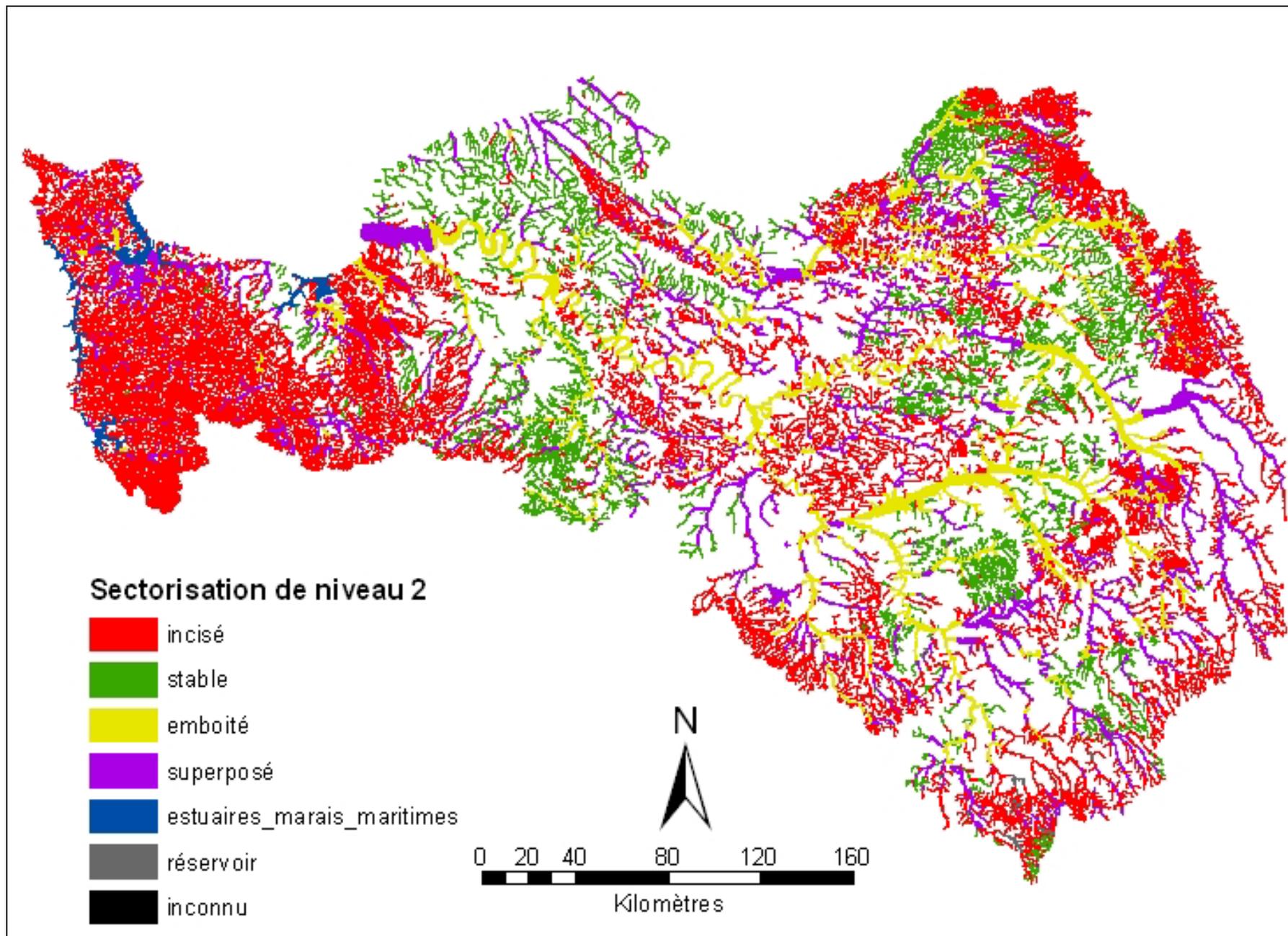


Figure 4. Répartition des types de zones humides riveraines définis au niveau 2 de la classification géomorphologique.

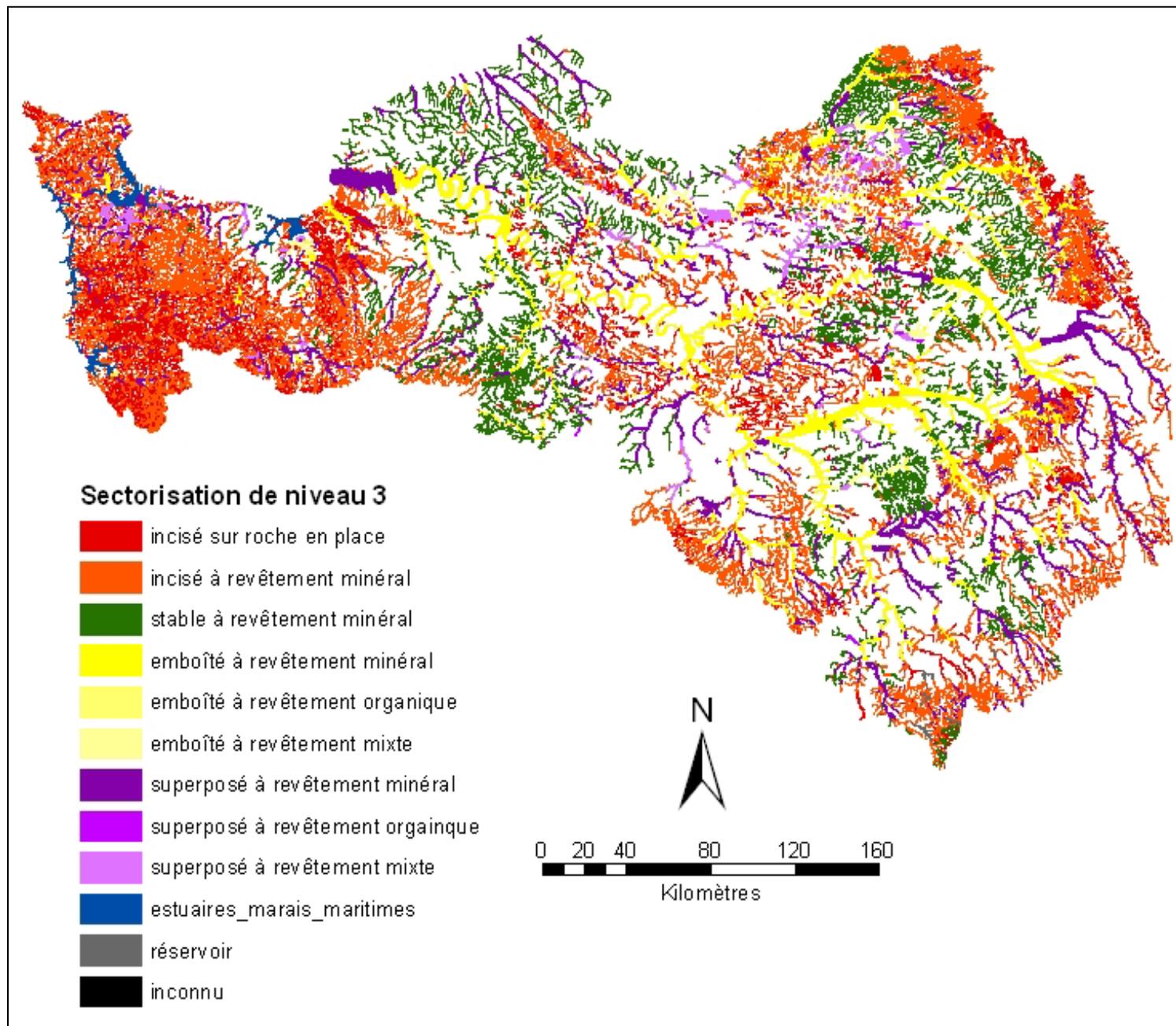


Figure 5. Répartition des types de zones humides riveraines définis au niveau 3 de la classification géomorphologique.

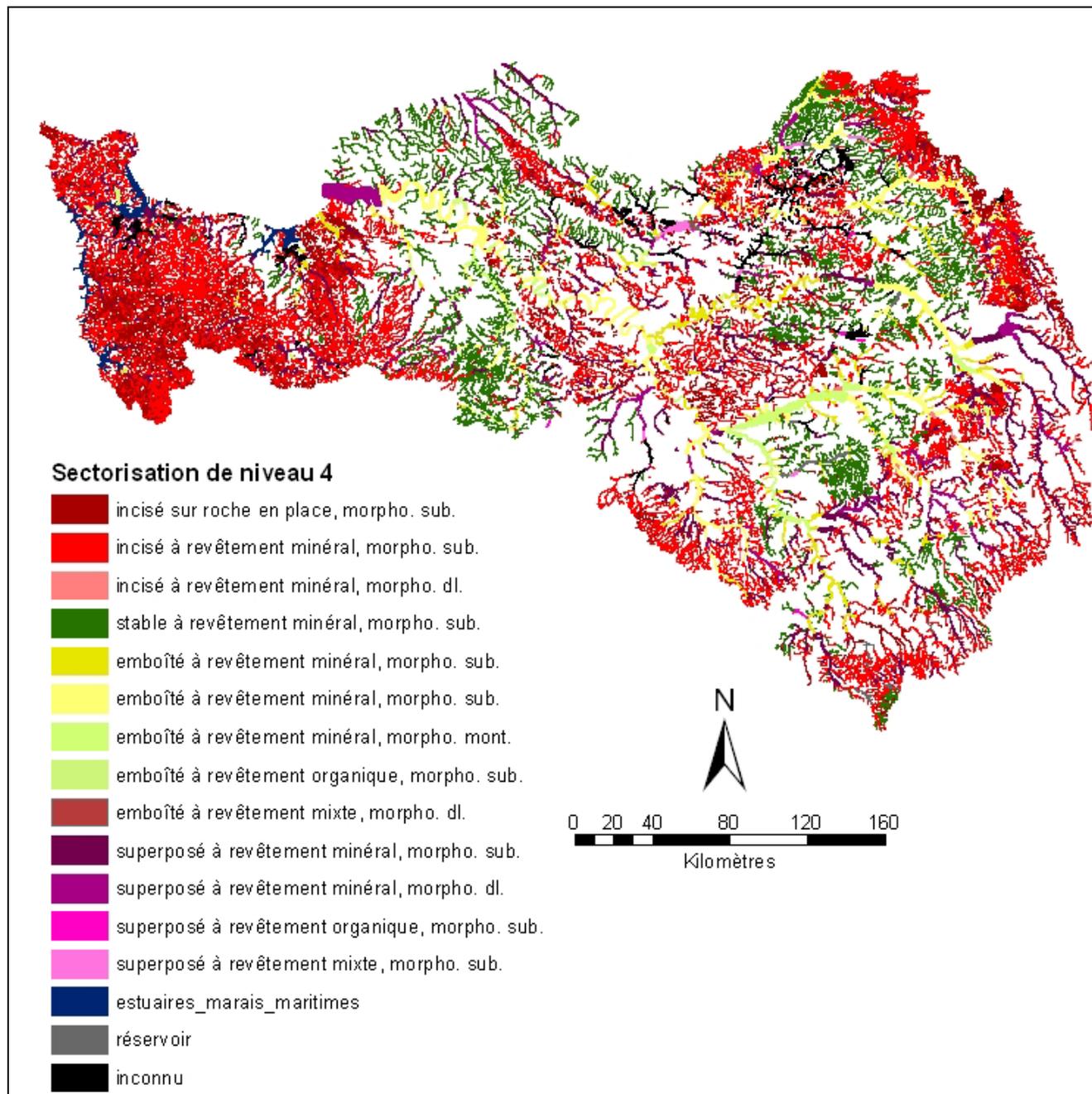


Figure 6. Répartition des types de zones humides riveraines définis au niveau 4 de la classification géomorphologique.

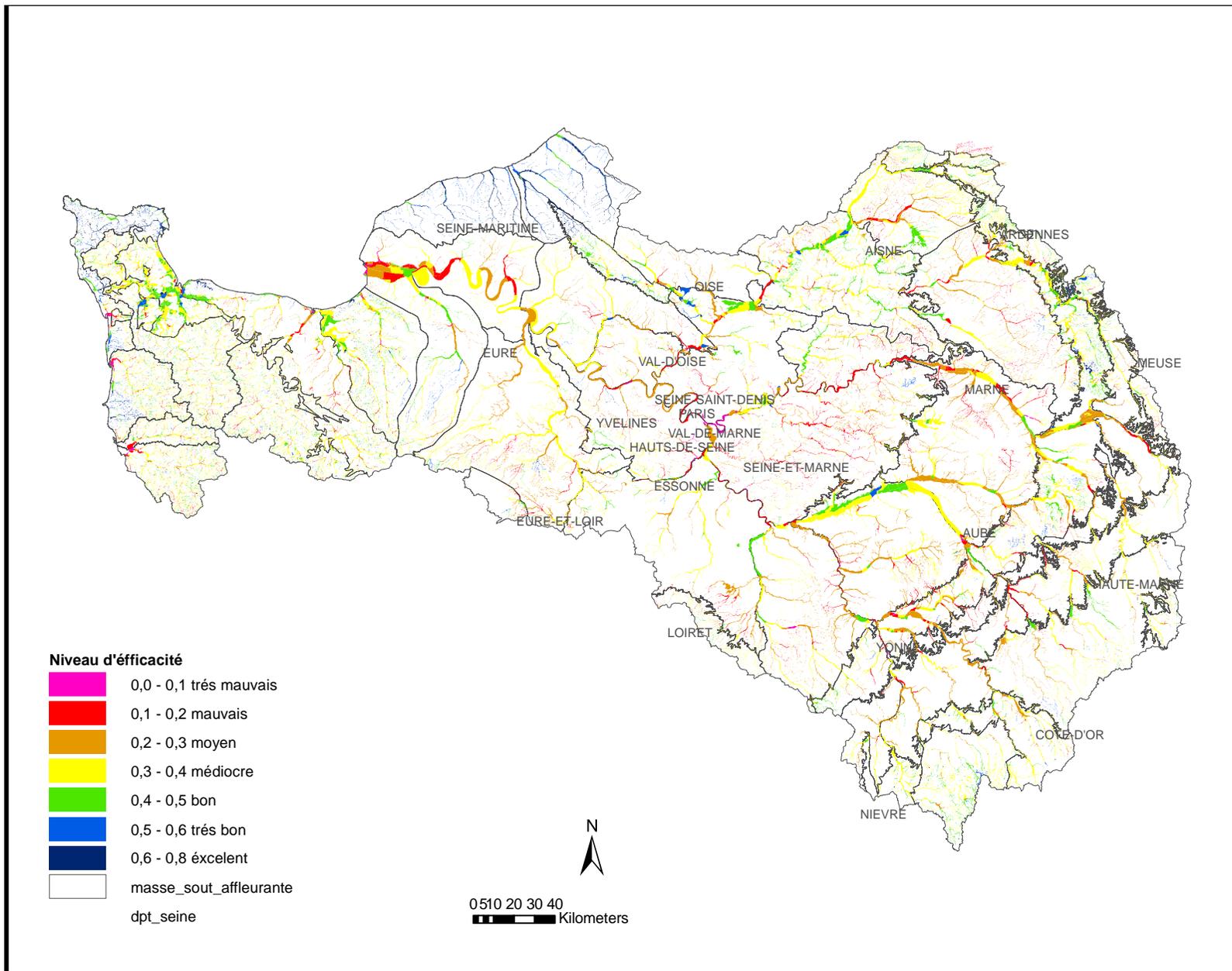


Figure 7. Indice calculé à partir des 5 indicateurs retenus par comparaison avec la mesure de la rétention des nitrates (chenaux secondaires, Type de végétation, gravières en eau, Largeur, Revêtement)

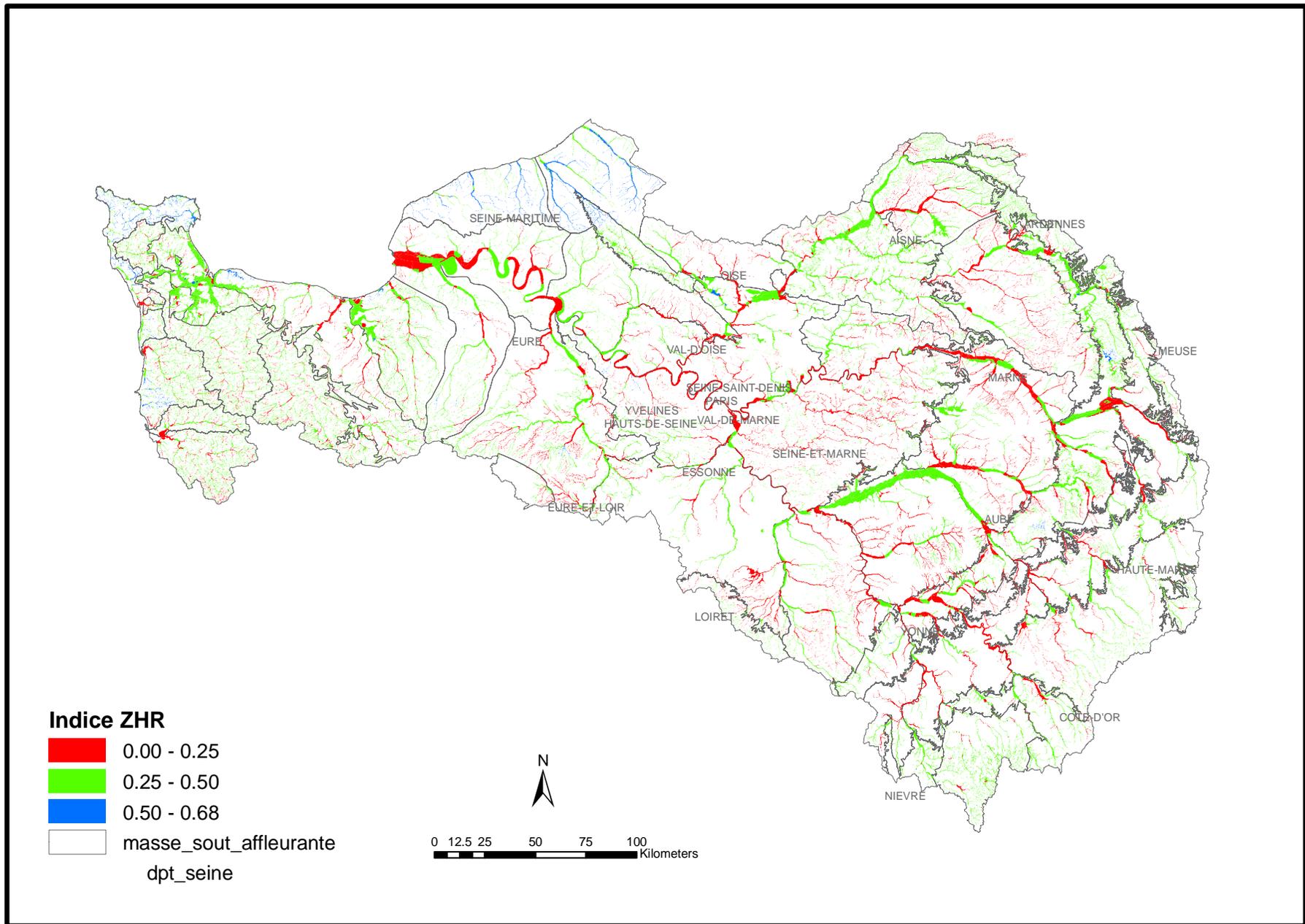


Figure 8. . Indice calculé à partir des 5 critères classé en trois niveaux

Zones Humides Fonctionnelles (NO3)

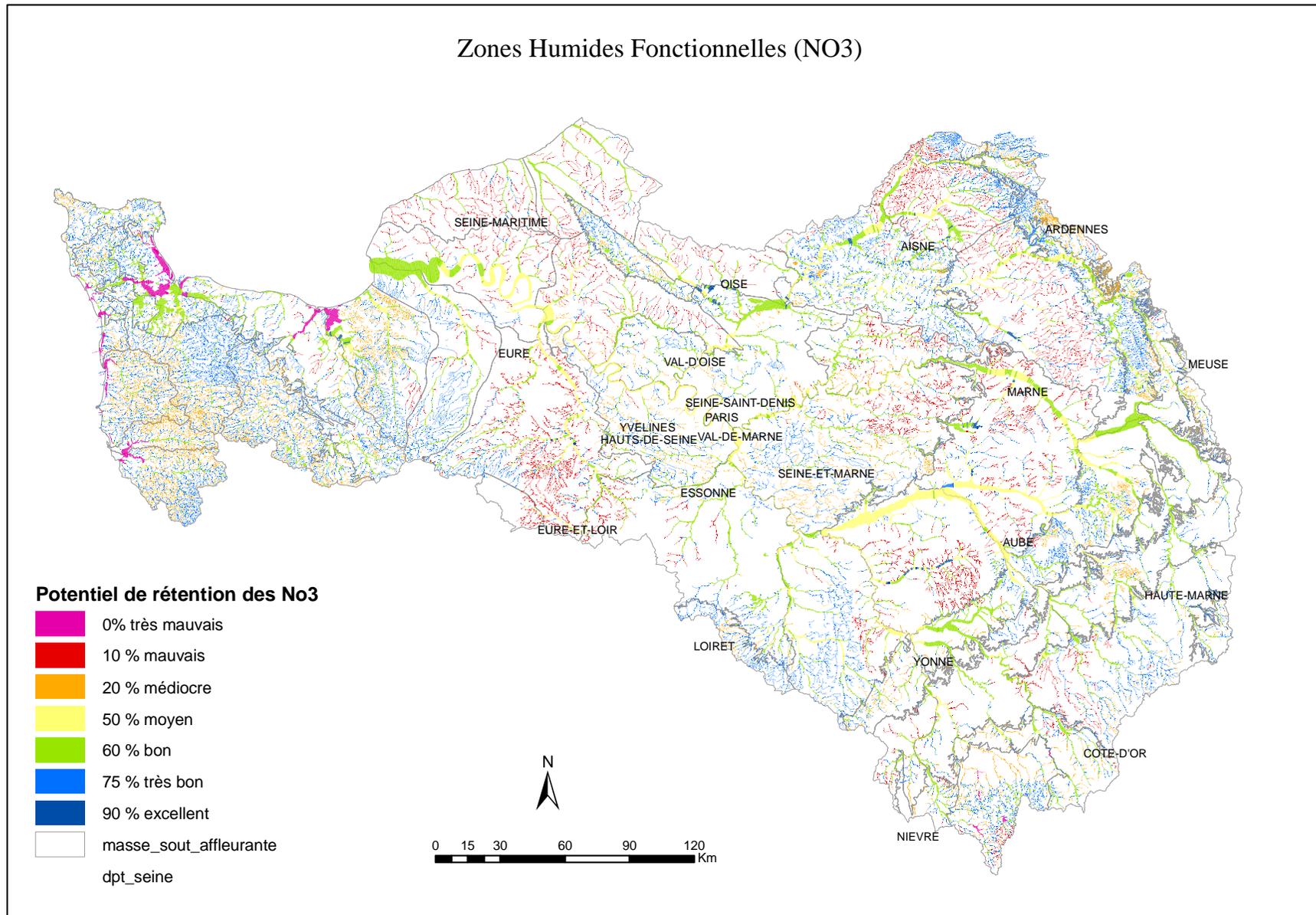


Figure 9. Indice de rétention des nitrates calculé à partir de la classification géomorphologique de S. Gaillard (niveau 3)