



HAL
open science

**Enveloppes des milieux potentiellement humides de la
France métropolitaine - notice d'accompagnement.
Programme de modélisation des milieux potentiellement
humides de France**

Emmanuel Thiry, Lionel Berthier, Marion Bardy, Jean-Philippe Chenu,
Lubomira Guzmova, Bertrand Laroche, Sébastien Lehmann, Blandine
Lemercier, Manuel Martin, Philippe Mérot, et al.

► **To cite this version:**

Emmanuel Thiry (Dir.). Enveloppes des milieux potentiellement humides de la France métropolitaine - notice d'accompagnement. Programme de modélisation des milieux potentiellement humides de France. , 50 p., 2014. hal-01209293

HAL Id: hal-01209293

<https://hal.science/hal-01209293>

Submitted on 5 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



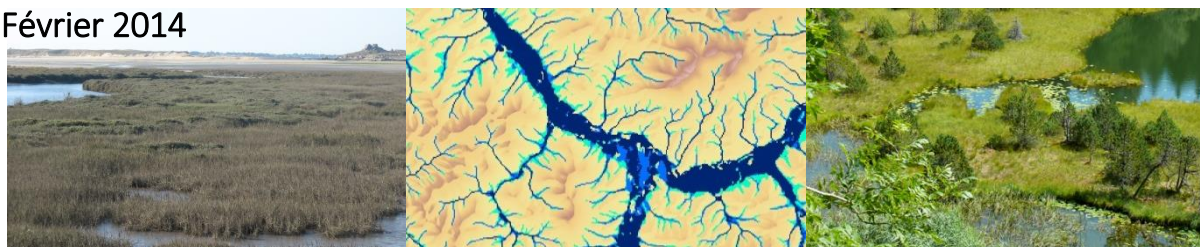
Enveloppes des milieux potentiellement humides de la France métropolitaine

- Notice d'accompagnement -

AGROCAMPUS-OUEST/INRA UMR SAS
65 rue de Saint Briec
CS 84215
35042 Rennes Cedex

US InfoSol
INRA Val de Loire
2163 avenue de la Pomme de Pin
CS 40001
45075 ORLEANS CEDEX 2

Février 2014



Groupement
d'intérêt
scientifique



Coordination :

Emmanuel Thiry, MEDDE, Direction de l'eau et de la biodiversité, sous-direction des espaces naturels

Rédaction :

Lionel Berthier (AGROCAMPUS-OUEST/INRA UMR SAS)

Marion Bardy (INRA US InfoSol)

Jean-Philippe Chenu (INRA US InfoSol)

Lubomira Guzmova (INRA US InfoSol)

Bertrand Laroche (INRA US InfoSol)

Sébastien Lehmann (INRA US InfoSol)

Blandine Lemerrier (AGROCAMPUS-OUEST/INRA UMR SAS)

Manuel Martin (INRA US InfoSol)

Philippe Mérot (AGROCAMPUS-OUEST/INRA UMR SAS)

Hervé Squidant (AGROCAMPUS-OUEST/INRA UMR SAS)

Emmanuel Thiry (MEDDE, Direction de l'eau et de la biodiversité, sous-direction des espaces naturels)

Christian Walter (AGROCAMPUS-OUEST/INRA UMR SAS)

Comment citer ce document :

MEDDE, GIS Sol. 2014. Enveloppes des milieux potentiellement humides de la France métropolitaine. Notice d'accompagnement. Programme de modélisation des milieux potentiellement humides de France, Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, Groupement d'Intérêt Scientifique Sol, 50 pages.

SOMMAIRE DU DOCUMENT

1. Introduction.....	1
1.1. Zones humides modélisées	1
1.2. Cadre d'utilisation de la carte produite.....	2
1.3. Méthodologie générale.....	3
2. Présentation des données mobilisées	4
2.1. Stratification du territoire en hydro-écorégions.....	4
2.2. Données topographiques	4
2.3. Données météorologiques	5
2.4. Données pédologiques.....	6
2.5. Données hydrologiques.....	10
3. Prétraitement des données.....	14
3.1. Calcul des indices topographique aval et de l'indice topo-climatique.....	14
3.2. Exploitation des données pédologiques et croisement avec les zones hydrographiques....	16
3.3. Adaptation de la stratification en hydro-écorégions	21
3.4. Simplification des données des enveloppes approchées d'inondation potentielles (création d'un masque simplifié).....	21
3.5. Calcul de la dénivelée au cours d'eau	22
3.6. Mise en place d'une classification topographique.....	23
4. Création des enveloppes intermédiaires et finales des milieux potentiellement humides	25
4.1. Seuillage des indices (enveloppes intermédiaires)	25
4.2. Représentation cartographique des enveloppes intermédiaires.....	28
4.3. Combinaison des enveloppes intermédiaires	29
4.4. Représentation cartographique des enveloppes finales des milieux potentiellement humides.....	32
5. Elaboration de classes de confiance au sein des enveloppes des milieux potentiellement humides	33
5.1. Création de l'indice de confiance pour les pixels des enveloppes seuillés à partir de la dénivelée au cours d'eau.....	33
5.2. Création de l'indice de confiance pour les pixels des enveloppes seuillés à partir de l'indice topo-climatique.....	33
5.3. Classification de l'indice de confiance en 3 classes.....	34
5.4. Représentation cartographique des indices de confiance au sein des enveloppes.....	35
6. Validation	36
6.1. Matrice de confusion et indicateurs statistiques.....	36
6.2. Validation France entière	37
6.3. Éléments de validation par HER	37
Conclusion	40
Bibliographie	42
Liste des figures.....	43
Liste des tableaux.....	45
Liste des annexes.....	46

1. Introduction

Ce travail de modélisation des milieux potentiellement humides de France a été sollicité par le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE, Direction Générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature, Direction de l'Eau et de la Biodiversité, Sous-Direction des Espaces Naturels, Bureau des Milieux Aquatiques), et réalisé conjointement par l'Unité 1106 InfoSol (centre du Val de Loire) de l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) et AGROCAMPUS OUEST, UMR 1069 Sol Agro hydrosystème Spatialisation AGROCAMPUS OUEST - INRA, centre de Rennes.

Le projet avait pour objectifs :

- le développement d'une méthode nationale homogène de modélisation des milieux potentiellement humides. Cette méthode représenterait une référence nationale permettant d'harmoniser les différents inventaires de terrain, cartographies et bases de données des milieux potentiellement humides déjà réalisées au niveau des départements, régions ou grands bassins versants.
- la réalisation de traitements correspondant à cette méthode, d'une part France entière avec les données disponibles de façon exhaustive sur le territoire métropolitain afin d'avoir une base cartographique homogène et, d'autre part, au niveau départemental ou régional sous forme de tests, afin de prendre en compte des données complémentaires non exhaustives qui peuvent exister sur ces entités.

Le présent document répond au premier objectif, et présente la méthodologie, les résultats et les limites d'utilisation de la carte des enveloppes des milieux potentiellement humides produites à l'échelle de la France métropolitaine.

1.1. Zones humides modélisées

Dans cette étude et en considérant la terminologie du Service d'Administration Nationale des Données et Référentiels sur l'Eau (SANDRE), **les zones modélisées correspondent aux milieux potentiellement humides** :

Un milieu humide est une portion du territoire, naturelle ou artificielle, caractérisée par la présence de l'eau. Un milieu humide peut être ou avoir été (par exemple d'après la carte de Cassini ou la carte d'état-major (1820-1866) en couleurs) en eau, inondé ou gorgé d'eau de façon permanente ou temporaire. L'eau peut y être stagnante ou courante, douce, salée ou saumâtre. Cette définition est assez proche de celle de « zone humide potentielle » de la typologie PEE (Potentielle, Effective, Efficace) développée par la recherche (Mérot *et al.*, 2000 ; 2006). Cette typologie permet de hiérarchiser les zones humides selon 3 niveaux : zone humide potentielle, zone humide effective et zone humide efficace (par rapport à une fonction particulière) (figure 1).

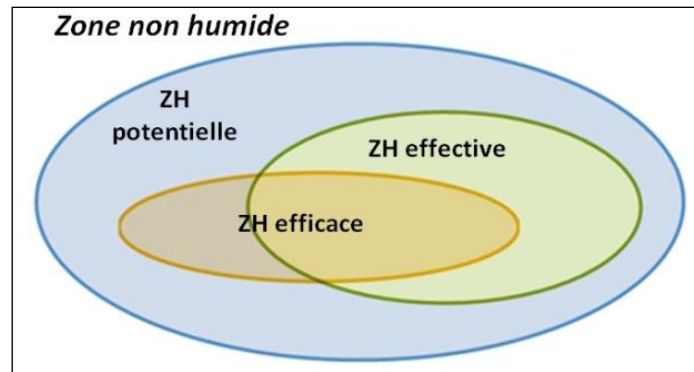


Figure 1 : représentation de l'organisation des zones humides selon l'approche PEE (d'après Mérot et al., 2006).

Le premier niveau de la typologie définit des zones humides potentielles (ou **milieux potentiellement humides**), ce sont les zones qui selon les critères géomorphologiques et climatiques devraient présenter les caractéristiques d'une zone humide; elles représentent en quelque sorte l'enveloppe extérieure maximale d'extension des zones humides. Les zones humides effectives qui se trouvent à l'intérieur du premier niveau, présentent des caractéristiques identifiables de milieu humide (correspondant aux critères définis par la Loi sur l'eau de 1992 notamment par la présence de sols hydromorphes et de végétations hygrophiles), ces caractères ont pu disparaître dans les milieux potentiellement humides du fait notamment d'aménagements (drainage, désalinisation, endiguement...). Enfin, le troisième niveau définit les zones humides efficaces. Cette notion d'efficacité est propre à une fonction particulière (fonction hydrologique, épuratrice, biodiversité, paysagère...). La zone humide efficace peut bien sûr être définie différemment selon la fonction considérée.

L'intérêt de l'approche PEE est de permettre la réalisation d'un inventaire spatialisé des zones humides :

- En délimitant des milieux potentiellement humides sur la base de méthodes déterministes par modélisation (pré-délimitation) ;
- En délimitant des zones humides effectives par des inventaires de terrain reportés sous SIG.

1.2. Cadre d'utilisation de la carte produite

L'étude est réalisée à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) au pas de 25 mètres dégradé au pas de 50 mètres pour permettre la réalisation de calculs sur la France entière. L'ensemble des traitements informatiques s'appuient sur ce **MNT au pas de 50 mètres qui constitue la résolution de la carte finale des milieux potentiellement humides produites. Cette résolution est compatible avec une échelle d'utilisation au 1/100 000**, mais n'augure pas de la justesse de l'information produite.

L'approche développée dans cette étude présente néanmoins des limites quant à la prédiction des milieux potentiellement humides. L'utilisation conjointe d'un indice topographique et d'enveloppes approchées d'inondation potentielle permet d'optimiser l'extension spatiale des milieux potentiellement humides, chacun des outils étant pertinent pour identifier spécifiquement les milieux humides de certains contextes géomorphologiques (tableau 1). Les zones karstiques, les plateaux et les zones humides de pente restent cependant difficiles à caractériser avec les outils développés.

Tableau 1 : pertinence définie *a priori* d'un indice topographique et des enveloppes approchées d'inondation potentielle pour prédire les milieux potentiellement humides.

	Milieux potentiellement humides correctement modélisés	Milieux potentiellement humides mal modélisés	Milieux potentiellement humides non modélisés
INDICE A BASE TOPOGRAPHIQUE	Têtes de bassin versant Cours d'eau d'ordre de Strahler faible	Zones karstiques Cours d'eau d'ordre de Strahler important	Plateaux Zones humides de pente
Enveloppes approchée d'inondation potentielle - DENIVELEE AU COURS D'EAU	Cours d'eau d'ordre Strahler important zones planes de type marais côtiers	Têtes de bassin versant	

1.3. Méthodologie générale

La méthodologie générale de l'étude (figure 2) s'appuie sur l'utilisation d'indices dérivés du MNT au pas de 50 mètres qui estiment le niveau de saturation en eau des sols. Ces dérivées nécessitent d'être seuillées (grâce à des données pédologiques et hydrogéologiques) et combinées afin de produire les enveloppes des milieux potentiellement humides.

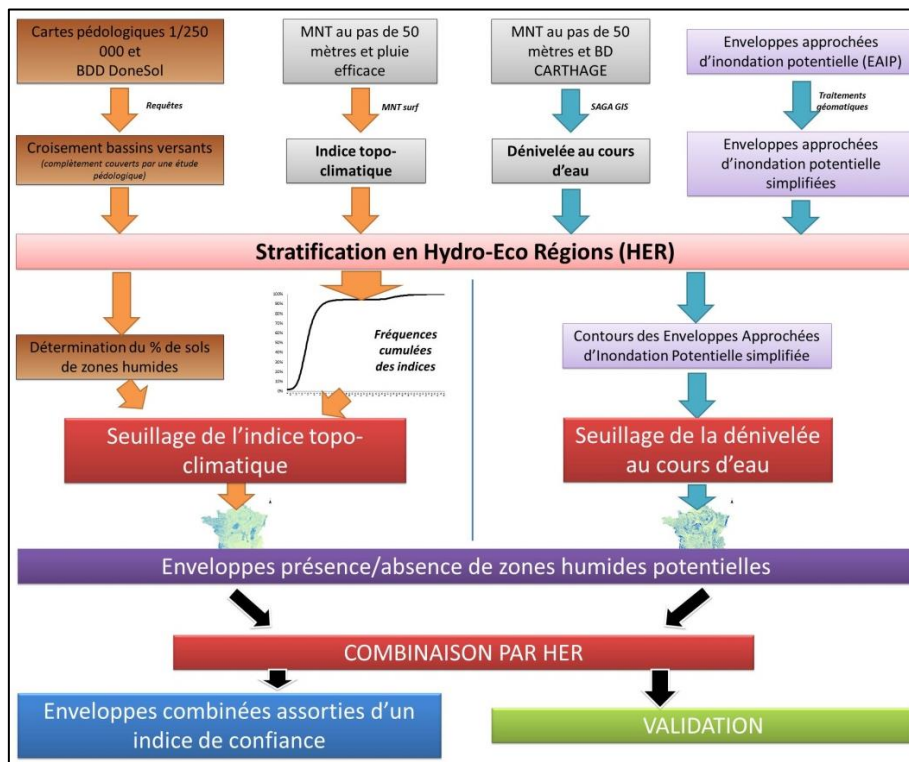


Figure 2 : ordiogramme général de la méthodologie employée.

2. Présentation des données mobilisées

2.1. Stratification du territoire en hydro-écorégions

La stratification utilisée est le découpage France métropolitaine en hydro-écorégions (HER) de niveau 1 (Wasson *et al.*, 2002, 2004) (figure 3). Celui-ci présente un ensemble de 22 hydro-écorégions qui permet dans un premier temps d'ajuster les seuils de l'indice topographique produit. Ce nombre est raisonnable au vu de l'extension spatiale de l'étude.

Chaque HER délimite un territoire cohérent du point de vue du fonctionnement hydrologique des cours d'eau dont les déterminants primaires sont la géologie, le relief et le climat. Elles ont été délimitées à l'aide de la lithologie de la carte géologique de France au 1/1 000 000, la densité du réseau hydrographique, l'altitude et les pentes issues du MNT au pas de 250 m, la pluviométrie et la température.

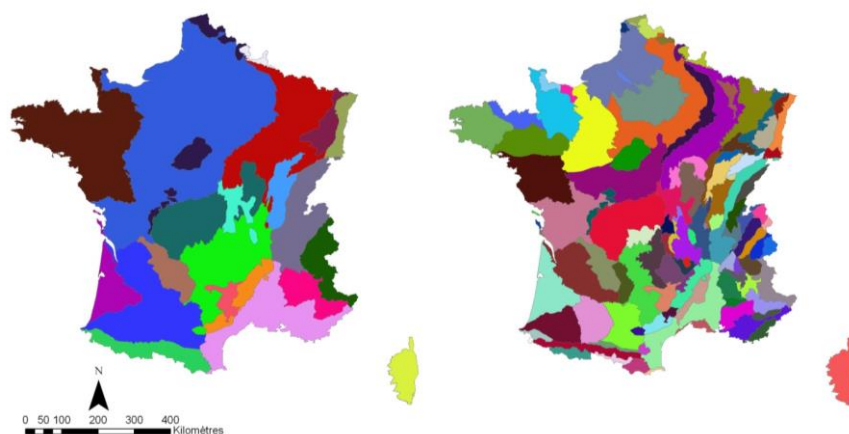


Figure 3 : Hydro-écorégions de niveau 1 (à gauche) et de niveau 2 (à droite).

Le découpage en HER du territoire est opportun car il intègre non seulement les grandes variations climatiques, géologiques et topographiques mais aussi le concept de masse d'eau.

2.2. Données topographiques

L'information sur l'altitude est une donnée clé pour la pré-délimitation des milieux potentiellement humides. Le MNT mobilisé est issu de celui de l'IGN au pas de 25 m (figure 4), agrégé au pas de 50 m pour permettre les traitements informatiques à l'échelle de la France. La perte de précision est minimale entre le MNT au pas de 25 m natif et le MNT au pas de 50 m agrégé, mais permet de diviser par 4 le nombre de cellules traitées.

Un certain nombre de dérivées topographiques du MNT au pas de 50 m, dont l'indice topographique aval et l'indice topo-climatique (Arousseau et Squvidant, 1995 ; Mérot *et al.*, 1995) ont été calculées sur la France métropolitaine.

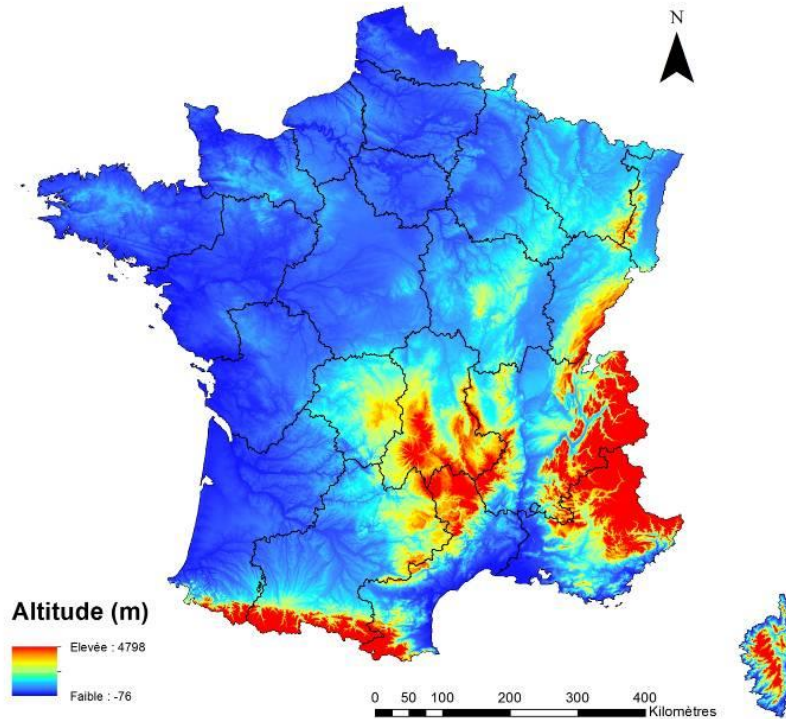


Figure 4 : MNT de l'IGN de la France métropolitaine au pas de 25 m (BD TOPO®, IGN, 2012).

2.3. Données météorologiques

Les deux facteurs pris en compte concernant la climatologie sont la pluviométrie et l'évapotranspiration potentielle. Ces deux informations sont utilisées pour calculer la pluie efficace, qui correspond à la différence entre la pluviométrie et l'évapotranspiration potentielle. Cette donnée météorologique (pluies efficaces) est issue du modèle SAFRAN de Météo France (Centre National de Recherches Météorologiques, CNRM). SAFRAN est un modèle spatialisé permettant de reconstruire des profils verticaux de différents paramètres de l'atmosphère (pluviométrie, rayonnement...) sur des zones climatiquement homogènes, en se basant sur des observations au sol, des produits de modèles de circulation générale à grande échelle et la prise en compte du relief.

Les données SAFRAN sont horaires et couvrent l'ensemble de la France métropolitaine à une résolution de 8 kilomètres. Pour les besoins de l'étude les données des pluies efficaces à un pas de temps mensuel sur une période allant de 1999 à 2008 ont été utilisées (figure 5).

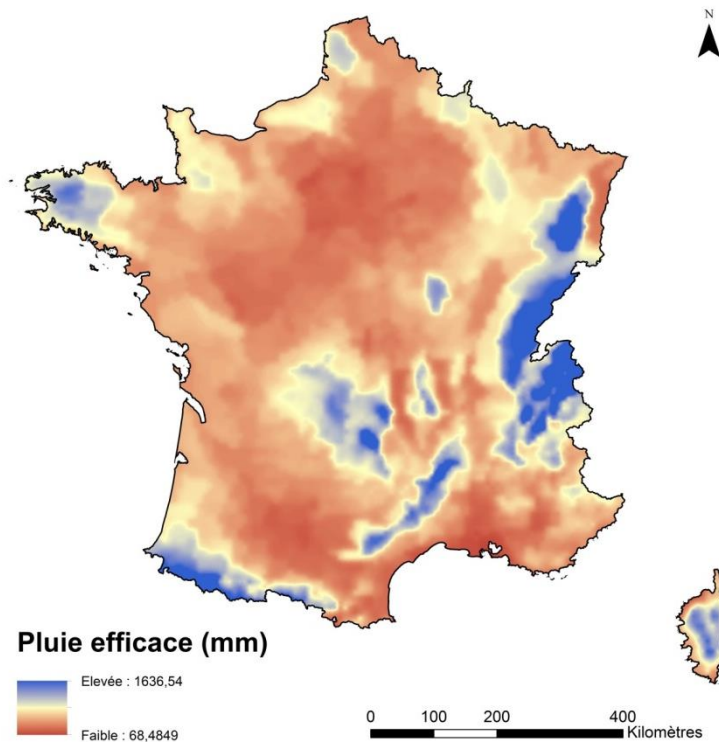


Figure 5 : pluies efficaces annuelles entre 1999 et 2008 spatialement interpolées (données Météo France).

2.4. Données pédologiques

Les données pédologiques sont indispensables pour la réalisation de plusieurs étapes de la modélisation : seuillages des indices et validation des résultats. Selon les étapes, les informations sur les sols mobilisées varient en termes d'échelle et de caractéristiques (données ponctuelles ou cartes).

Les cartes pédologiques (InfoSol, 2013) utilisées dans le cadre de cette étude, sont structurées en Unités Cartographiques de Sol (UCS), dont les contours sont délimités. Les UCS sont constituées de types de sols, les Unités typologies de Sols (UTS) (figure 6).

Une UTS représente une portion de la couverture pédologique qui présente les caractères diagnostiques d'une pédogenèse identique et qui présente en tout lieu de l'espace la même succession d'horizons, l'un ou l'autre de ces horizons pouvant être absent. Chaque UTS est définie par la succession d'une ou de plusieurs strates, et par leur organisation. Une strate représente la variation dans l'espace d'un horizon, ou d'une couche issue d'un regroupement de plusieurs horizons.

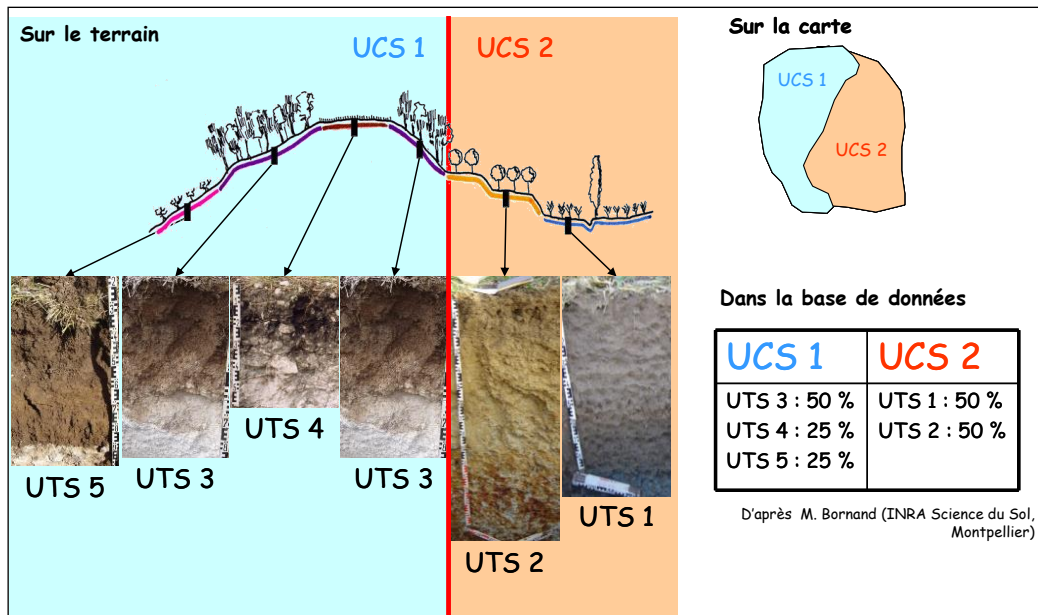


Figure 6 : exemple de délimitation en Unités Cartographiques de Sols (UCS) comprenant chacune plusieurs Unités Typologiques de Sols (UTS) [©M. Bornand Inra Montpellier].

A grande échelle (haute résolution), une UCS est décrite par une seule UTS, on parle alors d'unité simple. A petite échelle les différentes UTS sont regroupées dans des ensembles plus importants, appelés UCS, ces UCS sont dites complexes et sont composées de plusieurs UTS ayant des facteurs de pédogénèse homogènes (morphologie, lithologie, climat et dans certains cas occupation du sol). L'organisation spatiale des UTS au sein des UCS est le pourcentage de surface relatif de chacune des UTS au sein de l'UCS.

2.4.1. Les données à petite échelle : la Base de Données Géographique des Sols de France (BDGSF)

La Base de Données Géographique des Sols de France est une représentation des sols de France au 1/1 000 000. Il s'agit de la seule source d'informations sur les sols dont la couverture est exhaustive sur le territoire. Pour cette étude, seule l'information « matériau parental » contenue dans la BDGSF a été exploitée pour adapter la stratification du territoire en hydroécotones (3.3). L'information sur les matériaux de la roche mère permet de distinguer 126 classes (codes dominants et secondaires). Ces différents matériaux ont été regroupés à dire d'expert en 11 classes : dépôts alluviaux, calcaires, marnes calcaires, argiles, sables, grès, limon, formations détritiques, roches cristallines magmatiques et métamorphiques, roches méta-sédimentaires, matériaux organiques (figure 7).

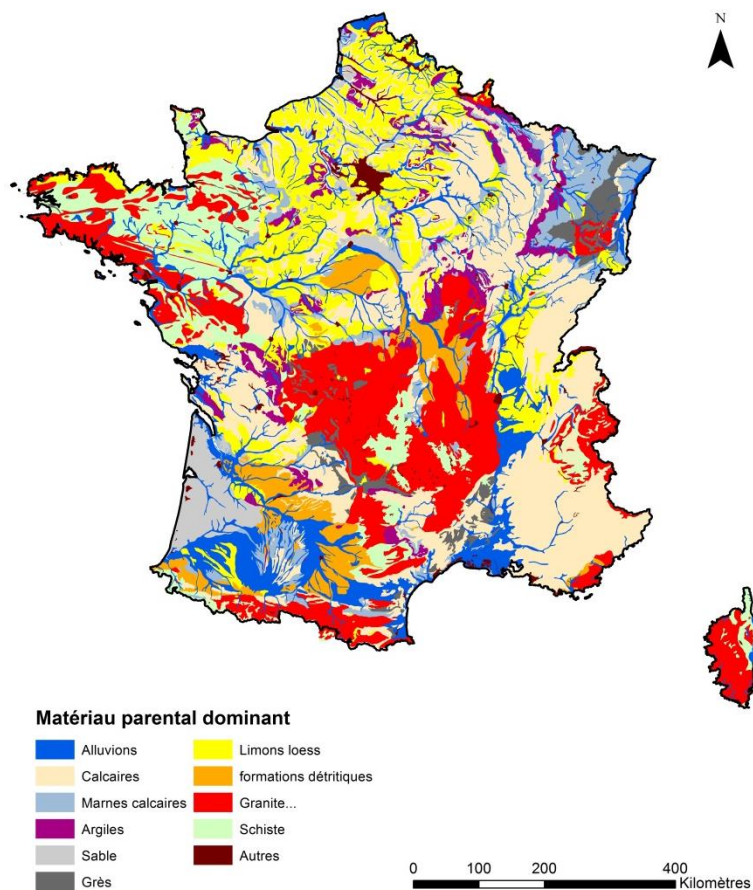


Figure 7 : matériau dominant de la BDGSF par unité cartographique de sols.

2.4.2. Les données à moyenne échelle (1/250 000) : la base de données DoneSol

Les données au 1/250 000 sont issues du volet référentiel régional pédologique (RRP) du programme national d'inventaire multi-échelle « Inventaire Gestion et Conservation des Sols » (IGCS) du Gis Sol, qui vise à constituer des bases de données sur les sols et leur répartition géographique. Les données des RRP sont stockées dans la base de données DoneSol, développée et gérée dans le cadre du Gis Sol¹. DoneSol est la structure (annexe 1) nationale de stockage de l'information pédologique, conforme à la norme NF X 31-560 qui fixe les règles de l'acquisition et de la gestion informatique des données pédologiques. Les données stockées dans DoneSol peuvent être extraites, combinées avec d'autres données et valorisées pour répondre à différentes thématiques (InfoSol, 2013). Actuellement, pratiquement toutes les régions sont engagées dans le programme RRP, mais toutes ne disposent pas encore de bases de données finalisées et exploitables.

Dans cette étude, les données du RRP à l'échelle 1/250 000 sont utilisées pour définir les seuils appliqués lors de la modélisation.

La figure 8 présente les données pédologiques mobilisées au 1/250 000 sur la France, ainsi que le pourcentage de zones humides établi suivant le principe développé dans la partie 3.2.

¹ www.gissol.fr

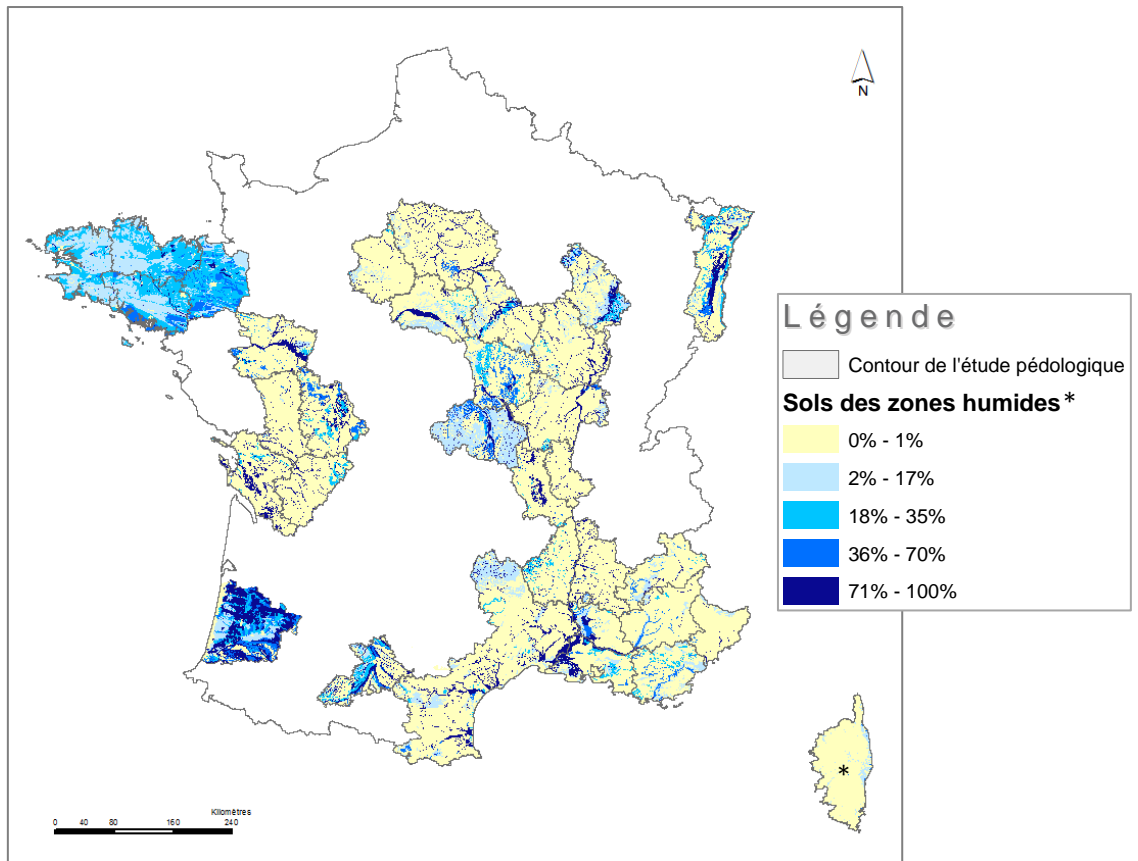


Figure 8 : Référentiels Régionaux Pédologiques au 1/250 000 disponibles pour la méthode de seuillage et estimation de la proportion de zones humides par UCS. *Les pourcentages en région Corse ont été déterminés par expertise.

2.4.3. Données pédologiques ponctuelles

Concernant les données pédologiques ponctuelles (profils et sondages) ce sont environ 130 000 points qui sont disponibles (figure 9). Chaque point pédologique est caractérisé en 3 classes (zone humide, zone non humide et cas particuliers). Pour les besoins de la validation les points classés en cas particuliers sont reclassés en zones humides. En considérant leur régime de submersion ces points peuvent être considérés comme des milieux potentiellement humides.

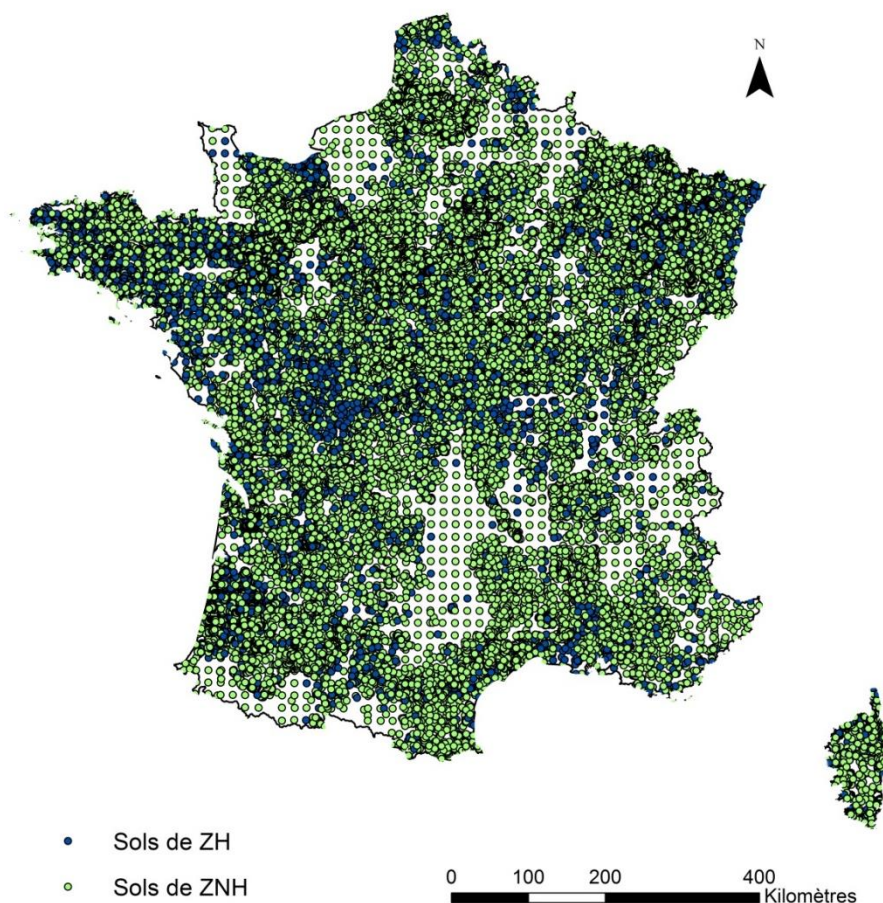


Figure 9 : répartition des données pédologiques ponctuelles de validation.

La répartition sur le territoire métropolitain des données pédologiques ponctuelles de validation n'est pas homogène, cette hétérogénéité peut constituer un biais vis-à-vis des indicateurs statistiques de validation.

2.5. Données hydrologiques

2.5.1. Zones hydrographiques

Les zones hydrographiques du SANDRE (figure 10) font partie du référentiel des aires hydrographiques (découpage hydrographique du 4^{ème} ordre) et de la codification hydrographique institués par la circulaire n°91-50 du 12 février 1991. Elles sont définies par cette dernière comme suit : « L'ensemble du territoire français est divisé en zones élémentaires appelées zones hydrographiques. Leurs limites s'appuient sur celles des bassins versants topographiques (en tout ou partie) ». Le choix de ce découpage permet de travailler sur un peu plus de 6000 unités hydrologiquement cohérentes.

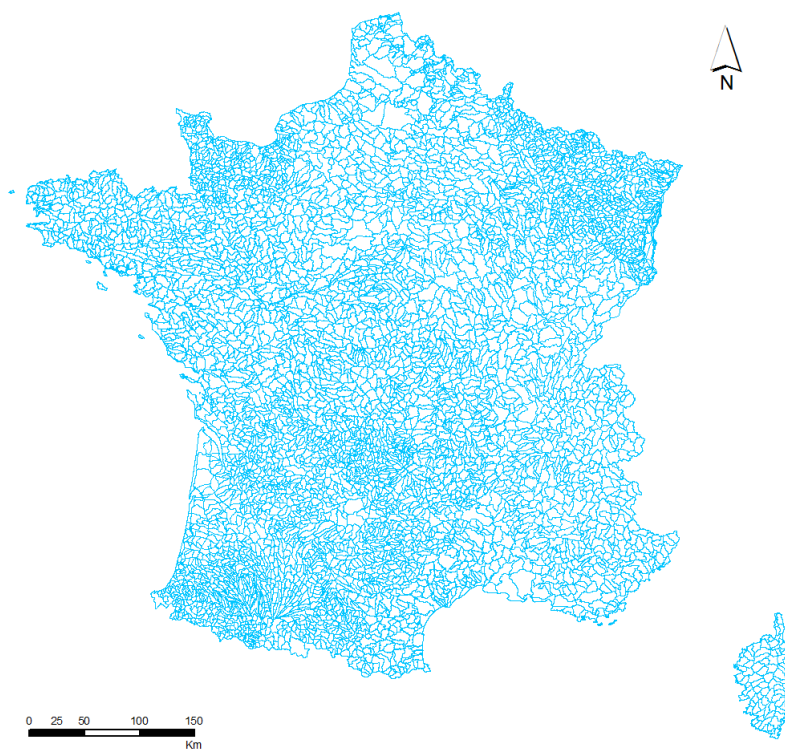


Figure 10 : zones hydrographiques du 4ème ordre, SANDRE, 2013.

Le Référentiel hydrographique de la BD CARTHAGE® (figure 11) permet d'avoir accès aux cours d'eau et aux plans d'eau.

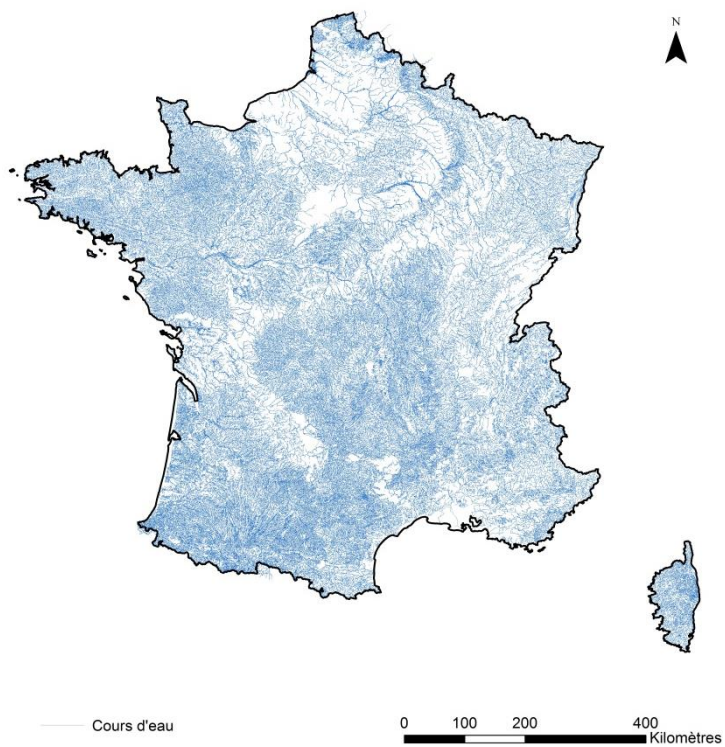


Figure 11 : cours d'eau de la BD CARTHAGE, SANDRE.

2.5.2. Enveloppes approchées d'inondation potentielles

Les enveloppes approchées d'**inondation potentielles** provenant de la première étape de la méthode d'Évaluation Préliminaire des Risques d'Inondation (EPRI) (MEDDE, 2011) ont été utilisées afin de séparer les grands lits fluviaux et les zones de plaines, difficiles à modéliser avec les indices à base topographique. Deux enveloppes ont été utilisées :

- l'enveloppe « **débordements de cours d'eau** » (EAIPce) qui comprend l'ensemble des phénomènes de débordement de cours d'eau et de ruissellement dans les talwegs ;
- l'enveloppe « **submersions marines** » (EAIPsm) intégrant les effets potentiels du changement climatique en considérant une rehausse potentielle d'un mètre des niveaux marins d'ici 2100.

Elles ont été créées par la fusion des sources d'informations d'échelles et de précision variables. En effet, ces couches synthétisent les connaissances déjà existantes sur l'emprise des inondations (plan de prévention des risques, atlas des zones inondables, études hydrauliques locales, traces d'alluvions modernes dans les fonds de vallées) et les complètent le cas échéant par une analyse de la topographie des territoires. Malgré la variété des informations utilisées, le contour approché des inondations potentielles, est largement exploitable à l'échelle 1/100 000.

2.5.3. Indice de Développement et de Persistance du Réseau hydrographique (IDPR)

L'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux, noté IDPR, a été conceptualisé par Mardhel (2004). Cet indice s'appuie sur la densité de drainage comme indicateur du niveau d'infiltrabilité des formations géologiques. Une entité spatiale composée de matériaux très perméables (karst, craie) aura une densité de drainage faible. À l'inverse, si elle est formée de roches imperméables (marnes, argiles, socle non altéré), elle présentera une densité de drainage élevée.

À l'échelle de la France, cet indice met en évidence des zones infiltrantes (IDPR faible) et des zones ruisselantes (IDPR élevé). L'IDPR mesure l'écart constaté entre un réseau hydrographique théorique et le réseau hydrographique naturel. Pour le calcul de cet indice, le réseau hydrologique naturel provient des données de la BD CARTHAGE IGN©. Le tracé du réseau théorique des écoulements est fondé sur l'analyse des talwegs : il suppose une lame drainée et un récepteur imperméable homogène. Il est établi à partir de l'analyse du modèle numérique de terrain (MNT). L'IDPR résulte alors du rapport, pour tout point de l'espace étudié, entre la distance au plus proche cours d'eau calculé et la distance au plus proche cours d'eau réel. L'IDPR permet de rendre compte indirectement de la capacité intrinsèque du sol à infiltrer ou ruisseler les eaux de ruissellement générées en surface, à l'échelle des versants. Il varie selon une échelle comprise entre 0 et 2000. Par souci de simplification, l'IDPR est arbitrairement multiplié par 1000 et limité à 2000 et produit à une résolution de 50 m (figure 12).

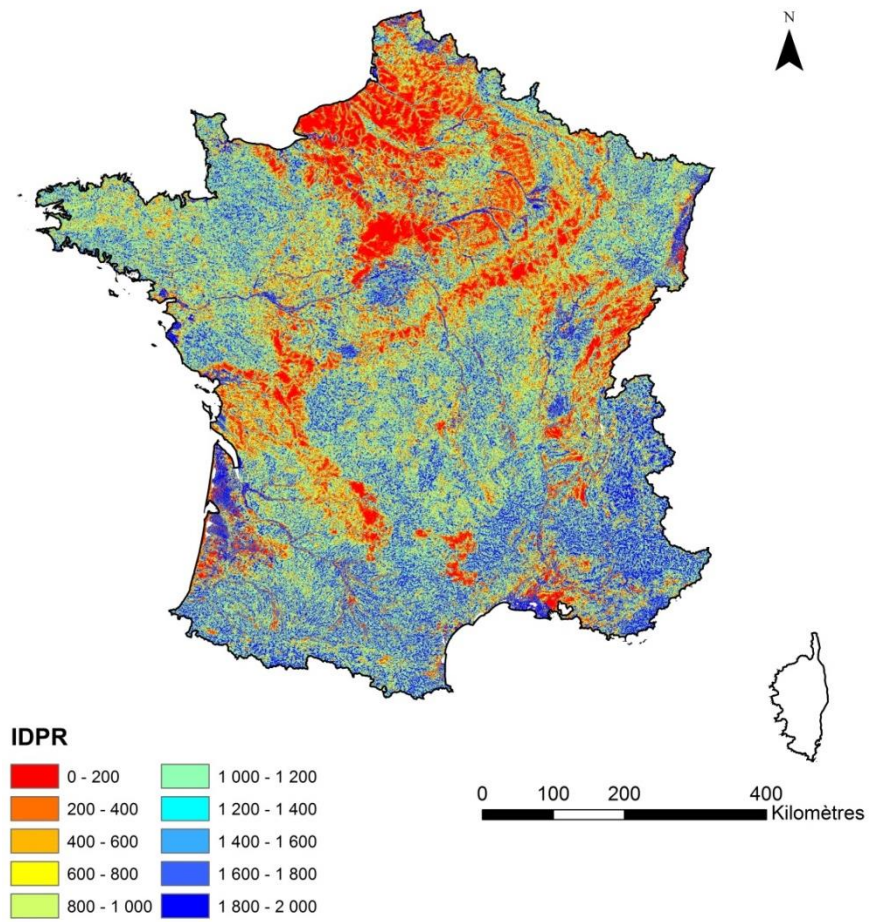


Figure 12 : cartographie de l'indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR).

3. Prétraitement des données

3.1. Calcul des indices topographique aval et de l'indice topo-climatique

Les milieux potentiellement humides peuvent être identifiées par l'utilisation de dérivées complexes des MNT : les indices topographiques. Ils correspondent à des indices d'estimation des zones saturées par l'eau. Ils permettent de renseigner des étendues vastes en un temps limité. Les indices présentés sont souvent dérivés du concept de l'indice de Beven-Kirkby (Beven et Kirkby, 1979) calculé par la formule suivante :

$$IB = \log\left(\frac{\alpha}{\tan\beta}\right) \text{ avec } IB \text{ l'indice de beven, } \alpha \text{ l'aire drainée et } \beta \text{ la pente}$$

Ces indices ont notamment été utilisés en Bretagne mais également sur plusieurs bassins versant européens au Pays-Bas, en Pologne, en Espagne, en Suisse et au Royaume Uni dans des contextes climatiques, géologiques et topographiques contrastés (Mérot et al., 2003). Des modèles numériques de terrain à des résolutions qui s'échelonnent de 10 à 50 m ont été utilisés.

Pour les besoins de l'étude deux indices dérivés du concept de l'indice de Beven-Kirkby ont été calculés à l'échelle du territoire métropolitain. Il s'agit de **l'indice topographique aval et topo-climatique**, ce dernier intégrant en plus une information sur le niveau d'alimentation en eau par les pluies efficaces (différence entre la pluviométrie et l'évapotranspiration potentielle).

Les formules et unités utilisées sont les suivantes :

$$IT_{\text{aval}} = \log\left(\frac{\alpha}{\tan\beta}\right) \text{ pour l'indice topographique aval}$$

avec α l'aire drainée (en ha) et β la pente avale (en %)

$$ITC = \log\left(\frac{Vr}{\tan\beta}\right) \text{ pour l'indice topo-climatique}$$

avec Vr le produit de l'aire drainée (en ha) et de la pluie efficace (en m^3) et β la pente avale (en %)

Le traitement du MNT comprend plusieurs phases : calculs et corrections (automatiques ou contraintes par le réseau hydrographique réel) des arbres de drainage mono et multidirectionnels (figure 13), calcul des aires drainées (surface drainée en tout point de l'espace), de la pente avale et intégration de la pluie qui serviront aux calculs des indices. L'ensemble des calculs ont été réalisés avec le logiciel MNT SURF (Arousseau et Squidant, 1995) sous environnement UNIX.

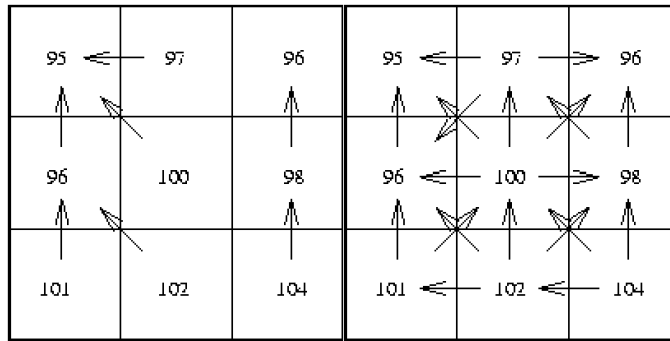


Figure 13 : exemple de modèle de drainage monodirectionnel et multidirectionnel (Aurousseau et Squidant, 1995).

Les indices topographique aval et l'indice topo-climatique calculés sont présentés respectivement par les figures 14 et 15. **Des valeurs des indices élevées indiquent une probabilité forte d'être en présence d'une zone humide.**

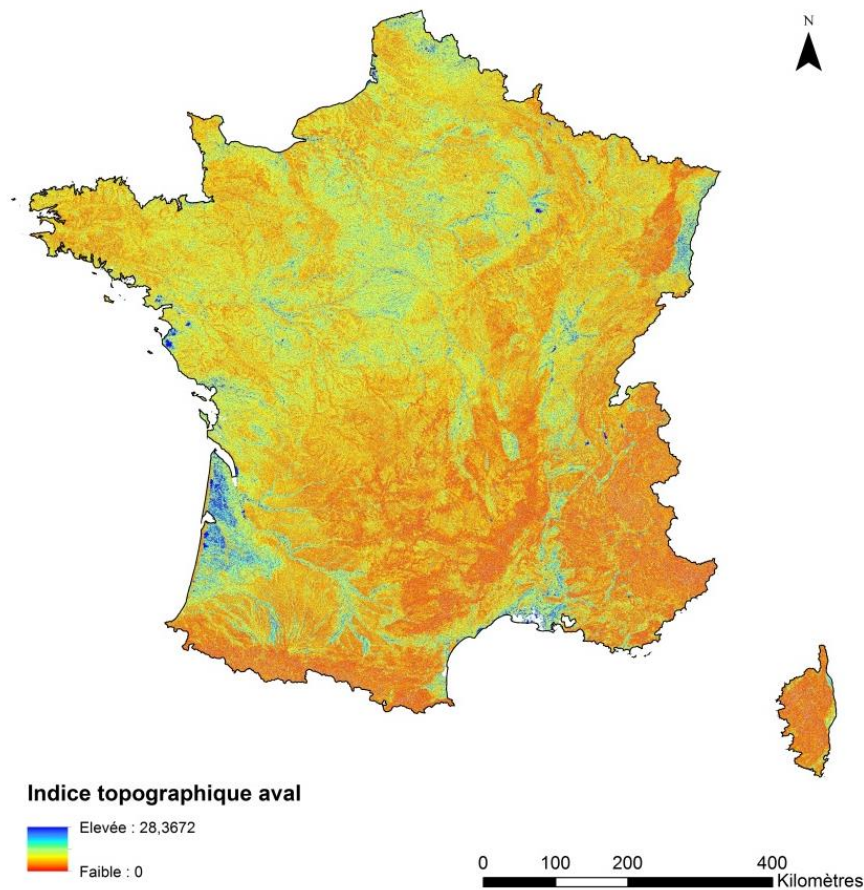


Figure 14 : indice topographique aval France entière calculé à partir du modèle numérique de terrain au pas de 50 mètres.

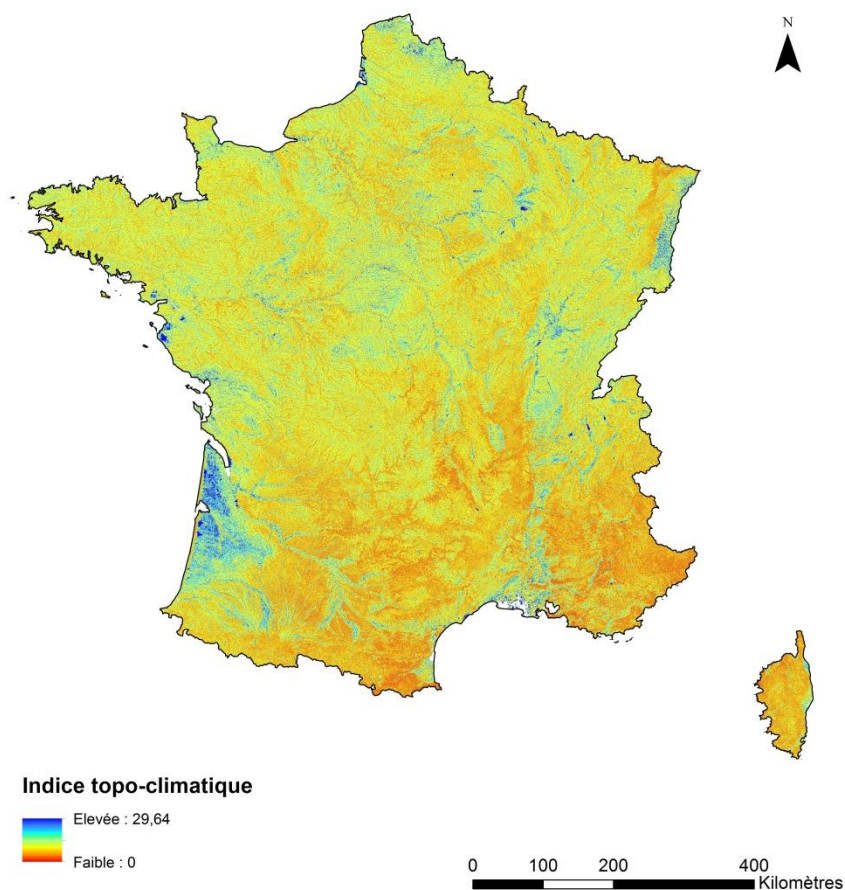


Figure 15 : indice topo-climatique France entière calculé à partir du modèle numérique de terrain au pas de 50 mètres et les données de pluie efficace du modèle SAFRAN interpolées et restituées à un pas de 50 mètres.

L'enjeu est donc de définir une valeur seuil au-dessus de laquelle on considère être en zone humide potentielle.

3.2. Exploitation des données pédologiques et croisement avec les zones hydrographiques

3.2.1. Calcul des pourcentages de sols de zones humides

Une requête a été créée (langage SQL), permettant de classer les Unités Typologiques de Sol (UTS) présentes dans la base de données DoneSol en 3 catégories, en référence aux critères pédologiques de l'arrêté du 1^{er} octobre 2009 relatif à l'identification et à la délimitation des zones humides :

- Sols de zones humides (classe 1)
- Sols de zones considérées comme des « cas particuliers » par l'arrêté (classe 3)
- Sols de zones non-humides (classe 2)

La requête permet de sélectionner comme sols de zones humides (classe 1) trois grandes catégories de sols :

- tous les **HISTOSOLS** car ils connaissent un engorgement permanent en eau qui provoque l'accumulation de matières organiques peu ou pas décomposées. Ces sols correspondent aux classes d'hydromorphie H du GEPPA modifié ;
- tous les **REDUCTISOLS** car ils connaissent un engorgement permanent en eau à faible profondeur se marquant par des **traits réductiques** débutant à moins de 50 centimètres de profondeur dans le sol. Ces sols correspondent aux classes VI (c et d) du GEPPA ;
- autres sols caractérisés par :
 - des **traits rédoxiques** débutant à moins de 25 centimètres de profondeur dans le sol et se prolongeant ou s'intensifiant en profondeur. Ces sols correspondent aux classes V (a, b, c, d) du GEPPA (figure 17) ;
 - ou des **traits rédoxiques** débutant à moins de 50 centimètres de profondeur dans le sol, se prolongeant ou s'intensifiant en profondeur, et des **traits réductiques** apparaissant entre 80 et 120 centimètres de profondeur. Ces sols correspondent à la classe IVd du GEPPA (figure 16).

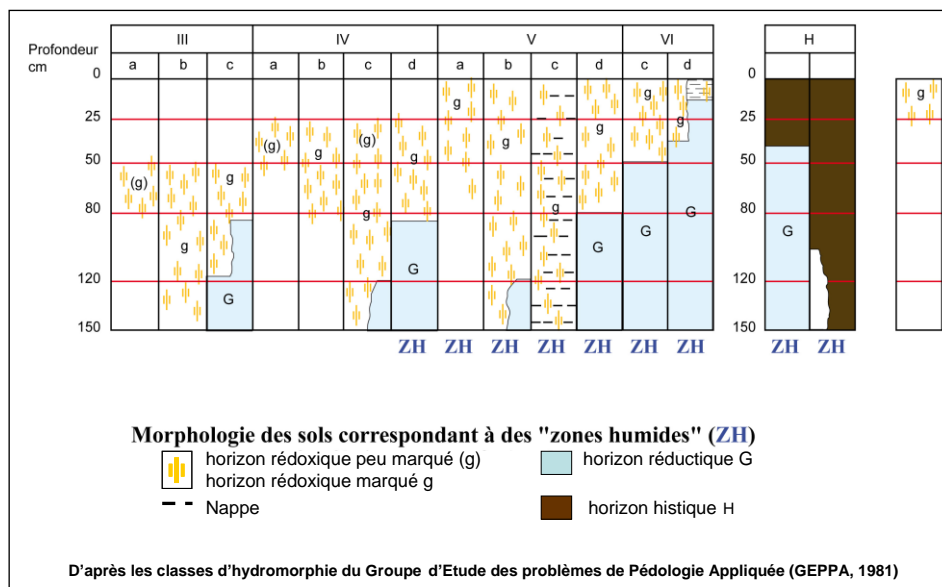


Figure 16 : classes d'hydromorphie (GEPPA 1981 ; modifié). Les classes Vb, Vc, Vd, VI, H correspondent à des sols de zones humides ; les classes IVd et Va et les types de sols correspondants peuvent être exclus par le préfet de région après avis du conseil scientifique régional du patrimoine naturel.

La requête permet aussi de sélectionner les cas particuliers de l'arrêté correspondant quant à eux à des **FLUVIOSOLS** ne présentant pas de traits d'hydromorphie visibles (*ie.* hors FLUVIOSOLS redoxiques et FLUVIOSOLS REDOXISOLS), à des **PODZOSOLS humiques** et à des **PODZOSOLS humo-duriques**. Ces sols de « cas particuliers » peuvent présenter un engorgement en eau fréquent et prolongé, sans que des traits caractéristiques de l'hydromorphie se développent. L'absence de fer dans le sol ou le fait que l'eau présente dans le sol soit oxygénée explique ces cas.

Cette requête fait appel aux informations des UTS et des strates de la base de données DoneSol. Elle est schématisée dans la figure 17 ci-dessous.

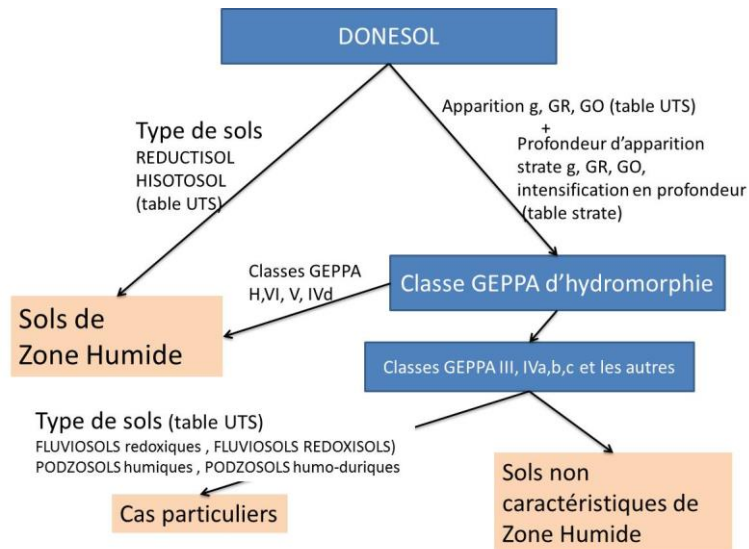


Figure 17 : représentation schématique de la requête globale sélectionnant les sols de zone humide, non-humide ou les cas particuliers. (g : traits rédoxiques et/ou réductiques ; Gr : horizon réductique, Go : horizon réductique à réoxydation temporaire).

Les résultats de cette requête ont permis de distinguer les UTS des sols humides.

Les données utilisées étant à l'échelle 1/250 000, les UTS ne sont pas représentables cartographiquement : les UCS sont complexes, c'est-à-dire qu'elles contiennent plusieurs types de sols (UTS). Une requête complémentaire a permis d'intégrer les résultats de la requête globale (sur les UTS) au niveau des UCS. Cela permet d'estimer la proportion de zones humides par UCS, à l'échelle d'un territoire donné.

Dans la base de données DoneSol, la table UTS est reliée à la table UCS par la table l_ucs_uts (figure 18), laquelle contient les pourcentages des UTS dans les UCS. Avec ces informations il est possible de regrouper les UTS des sols humides au sein des UCS et de les représenter cartographiquement par pourcentage (figure 19).



Figure 18 : représentation des liaisons et champs de liaison entre les différentes tables utilisées.

NO_ETUDE	UCS	UTS	ZH	%
2166	10405	108	3	100
	57602	3	3	15
		16	2	50
		52	1	3
		965	2	30
	71401	967	2	88
		654	3	20
		656	2	10
		738	2	10
		739	1	60

NO_ETUDE	UCS	% des SZH
2166	10405	100
	57602	18
	71401	80

Figure 19 : regroupement des UTS des sols des zones humides (SZH) au sein des UCS complexes, et calcul de leurs pourcentages (% des SZH).

A ce stade du projet les classes 1 et 3 (Sols de zones humides et « cas particuliers ») sont regroupées dans une classe unique des sols des zones humides. La méthode employée aura donc plutôt tendance à surestimer les pourcentages de sols de zones humides.

3.2.2. Estimation du pourcentage de sols hydromorphes par zone hydrographique

Afin de travailler à partir d'informations hydrologiquement cohérentes, le seuil de l'indice topographique au-dessus duquel on considère être en zone humide est défini à partir d'informations pédologiques intégrées au niveau des bassins versants (données hydrographiques, paragraphe 2.7.). La définition du seuil par bassin versant nécessite de connaître le pourcentage des sols humides intégré par bassin versant. Pour ce faire, la couche des études pédologiques est croisée géographiquement avec celle des bassins versants sous ArcMap10.1 (figure 20)

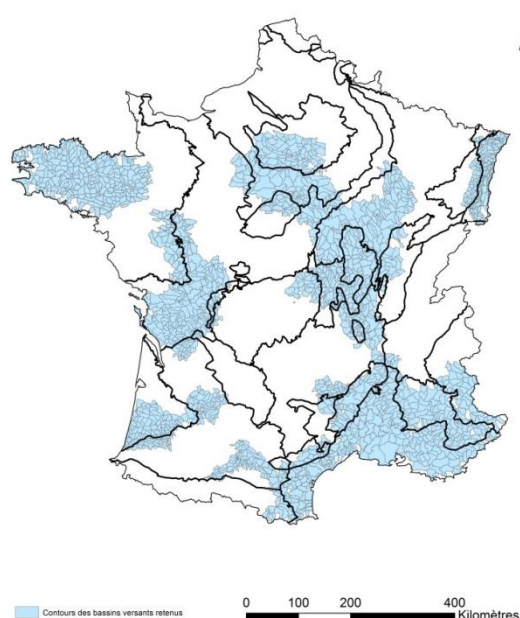


Figure 20 : extension spatiale des bassins versants retenus, couverts complètement par une étude pédologique au 1/250 000.

Puis le pourcentage des sols caractéristiques des zones humides calculé précédemment est affecté à chaque unité cartographique de sols incluse dans les bassins versant étudiés (figure 21 a et b).

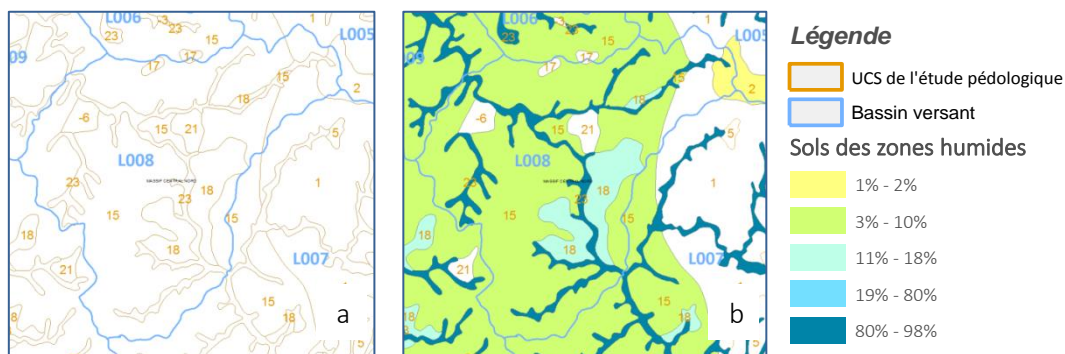


Figure 21 : croisement géographique de la couche pédologique avec celle des bassins versants (a) et les sommes des pourcentages des UTS des sols humides au sein des UCS complexes (b).

Une table intermédiaire est ainsi obtenue contenant pour chaque polygone : un identifiant de bassin versant (BV), un identifiant d'UCS, la surface des polygones des UCS intersectés par bassins versants (S_{int}), le pourcentage des sols des zones humides de ces UCS (% des SZH). La multiplication des surfaces des polygones intersectés par des proportions des sols des zones humides permet d'obtenir la superficie des sols des zones humides par polygone (S_{sh}) (figure 22).

BV	UCS	S_{int} (ha)	% des SZH	S_{sh} (ha)
L008	1	326	0	0
	2	94	2	1,9
	23	125	88	110
		533	88	469

Figure 22 : étape de calcul permettant d'estimer la superficie des sols de zones humides par bassin versant.

Il suffit alors de sommer pour chaque BV (figures 21b et 23) les superficies en zone humide et les superficies totales des polygones intersectés, pour obtenir le pourcentage des sols des zones humides par bassin versant (annexe 2).

BV	Sum_ S_{int} (ha)	Sum_ S_{sh} (ha)	Pourcent SH
P300	6697	1226	18,30%
L008	6189	9096	14,70%
L004	8169	3986	4,90%

Figure 23 : calcul final permettant d'estimer le pourcentage de sols de zones humides par bassin versant.

3.2.3. Cas particuliers (Corse)

Le Référentiel Régional Pédologique de la Corse est en cours de constitution. L'Office du Développement Agricole et Rural de la Corse (ODARC), en charge de ce travail, a fourni la couche graphique au 1/250 000 accompagnée d'un pourcentage de sols de zones humides qui correspond au pourcentage général de sols répondant aux critères de zone humide.

3.3. Adaptation de la stratification en hydro-écorégions

Après avoir mené une analyse des données concernant les HER (niveaux 1 et 2) et des enveloppes approchées d'inondation potentielle, des opérations de géomatique ont été opérées sur ces deux informations. Elles consistent en l'ajout d'HER de niveau 2 au niveau HER1 et en une simplification des enveloppes approchées d'inondation potentielle.

Deux HER de niveau 2 (Haute-Normandie/Picardie et tables calcaires/auréole du crétacé) ont été fusionnées et individualisée au sein de l'HER « tables calcaires » de niveau 1 (figure 21). Ce choix est fondé sur l'analyse du matériau parental et de l'indice de persistance du réseau hydrographique (IDPR). Les HER ayant servi de base de stratification à la suite du travail sont présentées par la figure 24.

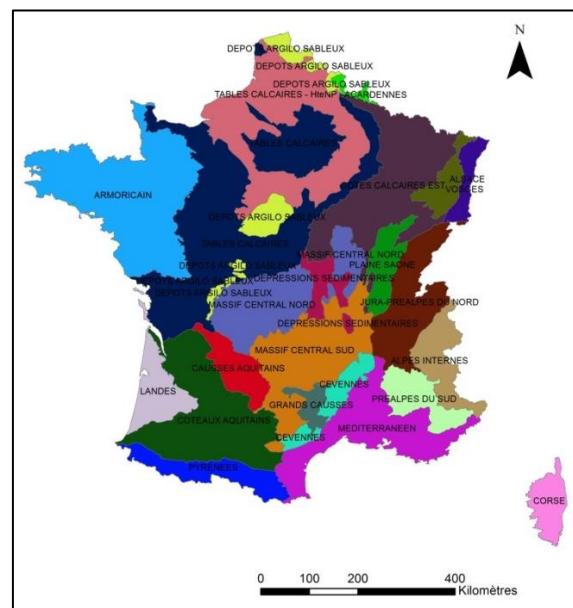


Figure 24 : HER de niveau 1 modifiées après prise en compte d'une HER de niveau 2.

3.4. Simplification des données des enveloppes approchées d'inondation potentielles (création d'un masque simplifié)

Des études préalables (Mérot *et al.*, 2003) ont montré que les milieux potentiellement humides sont mal prédites dans les contextes suivants : marais, vallées fluviales larges et zones karstiques. Des outils sur la dénivelée au cours d'eau sont plus pertinents dans ces contextes. Les EAIP à ce titre peuvent servir de données de seuillage au même titre que les cartes pédologiques pour les indices topographiques. A partir des données transmises sur les Enveloppes Approchées d'Inondation Potentielle (EAIP), un traitement géomatique a été opéré afin de simplifier les géométries et d'exclure les zones de tête de bassin, mieux prédites par les indices topographiques seuillés. A l'aide de méthode de filtrage les plus petites entités ont été supprimées et seules les entités d'une superficie supérieure à 5000 ha ont été conservées (figure 25).

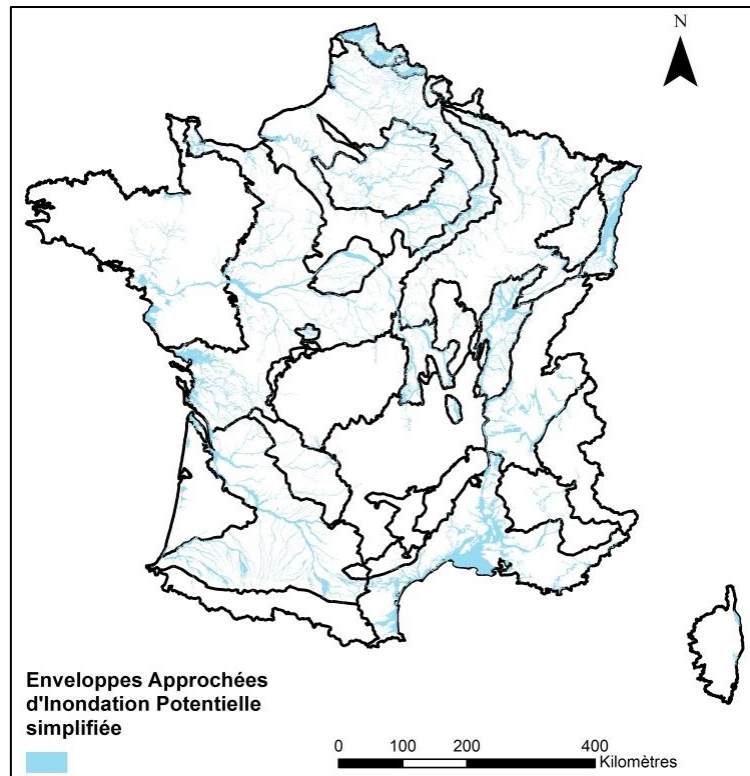


Figure 25 : EAI simplifiées France entière.

Ces données serviront notamment à seuiller la dénivelée au cours d'eau dans les zones de marais côtiers (marais Poitevin, Camargue notamment), de grande vallée alluviale c'est à dire à proximité de cours d'eau d'ordre de strahler important (Loire, Rhône...).

3.5. Calcul de la dénivelée au cours d'eau

Le calcul de la dénivelée hydrologique au cours d'eau a été réalisé sur le territoire métropolitain au moyen du module « Vertical Distance to Channel Network » du logiciel de SIG SAGA. Les données pour déterminer la dénivelée au cours d'eau sont l'altitude (modèle numérique de terrain au pas de 50 mètres) et réseau hydrologique de la BD CARTHAGE. Seuls les cours d'eau naturels ont été conservés pour cette analyse. Les résultats France entière sont représentés en figure 26. Cette donnée sera seuillée au moyen des contours des enveloppes approchées d'inondation potentielle simplifiées (figure 25).

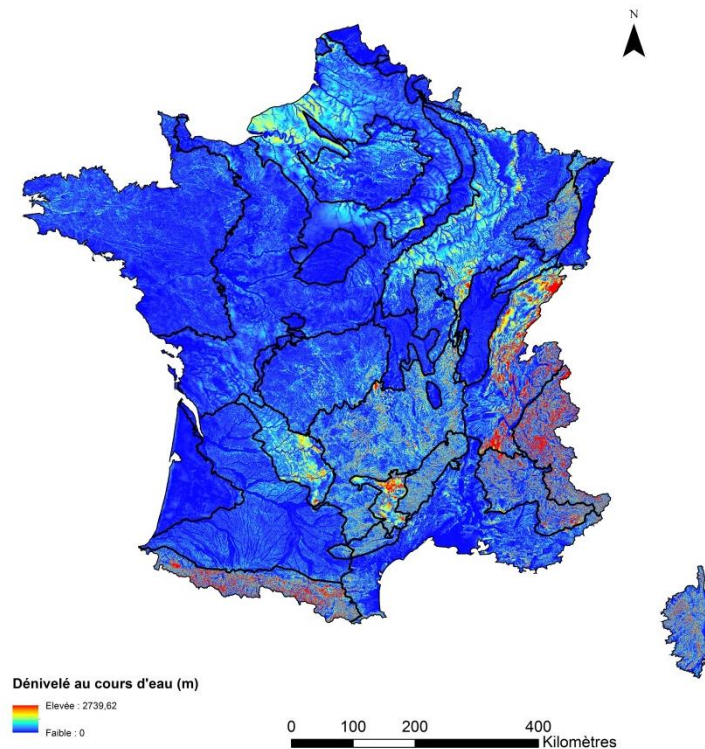


Figure 26 : dénivelée au cours d'eau calculée à partir du MNT au pas de 50 m et du réseau hydrographique de la BD CARTHAGE® (IGN, 2012 ; SANDRE, 2013).

3.6. Mise en place d'une classification topographique

Les contextes géomorphologiques marais et de grandes vallées fluviales nécessitent d'être spatialement identifiés à l'aide d'une classification topographique afin de pouvoir appliquer le cas échéant les enveloppes de l'indice topo-climatique ou de la dénivelée au cours d'eau. La classification topographique mise en place s'appuie sur des outils développés pour ArcGis 10 et se basant sur les travaux concernant l'indice de position topographique (Jenness et *al.*, 2013) comparant l'altitude d'une cellule aux cellules voisines d'un modèle numérique de terrain

Pour cette étude il a été décidé d'utiliser dans une première phase l'outil de classification distinguant 4 classes topographiques (sommet, vallées étroites, faible pente et forte pente) avec les paramètres suivants :

- Rayon d'analyse de 50 mètres
- Seuil de pente de 2%

En utilisant les données de dénivelée au cours d'eau il a été possible de **distinguer une nouvelle classe topographique parmi les faibles pentes** rassemblant les grandes vallées alluviales, les marais côtiers et les plaines.

La classification topographique réalisée (figure 27) distingue 5 classes :

- Sommets et versants convexes,
- Vallées encaissées
- Pentés faibles et plateaux (< 2%)

- Pente fortes (> 2%)
- Vallées larges, marais côtiers et plaines

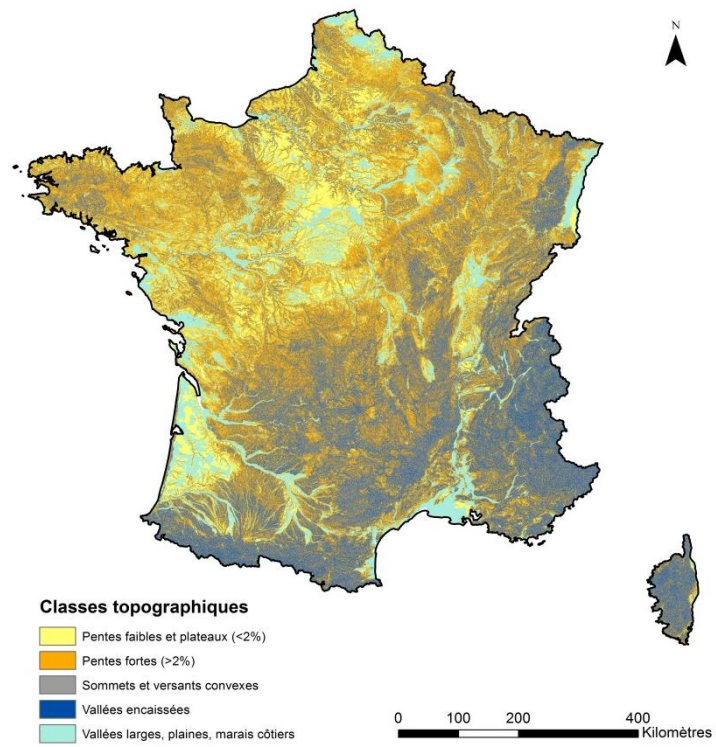


Figure 27 : classification topographique du territoire en 5 classes

4. Création des enveloppes intermédiaires et finales des milieux potentiellement humides

4.1. Seuillage des indices (enveloppes intermédiaires)

4.1.1. Indice topo-climatique

Au sein de chaque HER, les fréquences cumulées des indices topographique aval et topo-climatique sont calculées. Pour se faire, l'outil Geospatial Modeling Environment (GME) (Beyer, 2012) a été utilisé. La figure 28 montre les résultats obtenus pour l'indice topo-climatique, pour 6 HER.

Les pourcentages de sols de zones humides et de sols de zones non humides (calculés à partir des bases de données sols au 1/250 000) permettent de déterminer les seuils de l'indice topo-climatique qui **optimisent la répartition entre les zones non humides et les zones potentiellement humides** de chaque HER.

Le pourcentage de zones humides par HER est déterminé en réalisant la moyenne pondérée (par les surfaces) des pourcentages de sols de zones humides des bassins versants inclus dans l'HER et couverts par une étude pédologique au 1/250 000.

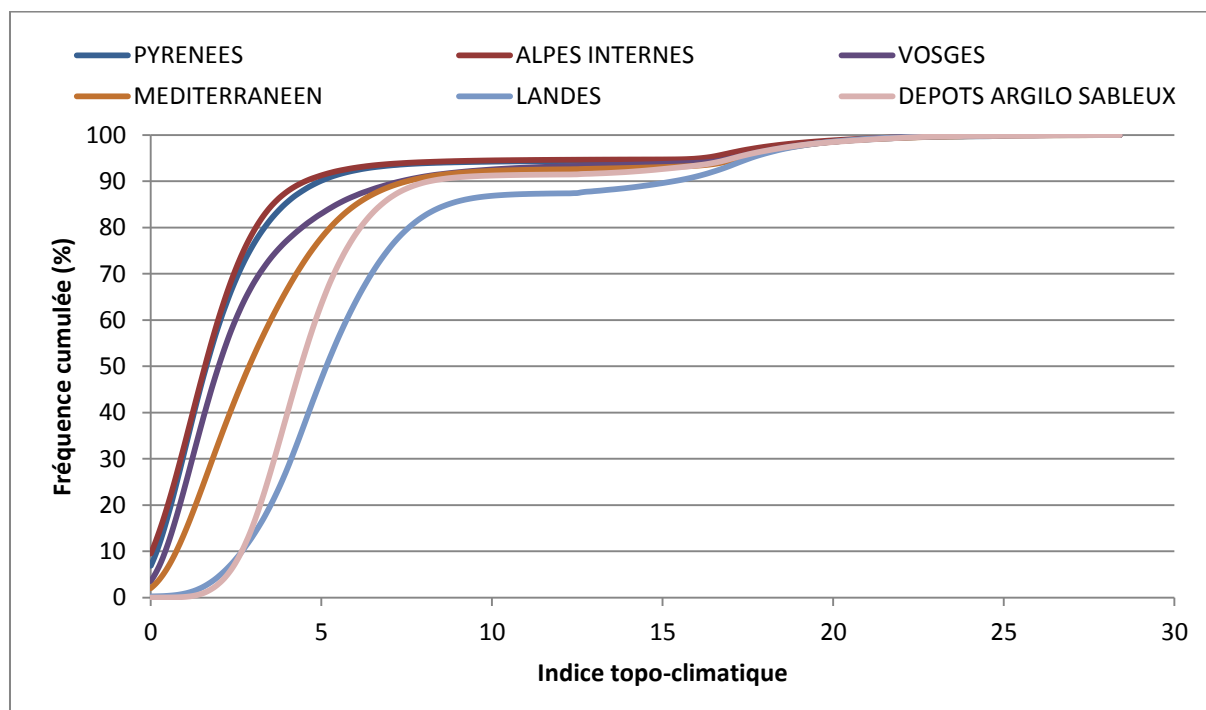


Figure 28 : fréquences cumulées de l'indice topographique aval de 6 HER.

4.1.2. Seuils de l'indice topo-climatique

Le tableau 2 présente les pourcentages de sols de zones humides et les seuils associés de l'indice topo-climatique, sur les bassins versants où les sols sont connus au 1/250 000. Les pixels dont **les valeurs sont supérieures à ces seuils** seront classés en zone humide potentielle.

Tableau 2 : récapitulatif des paramètres de seuillage des indices topographique aval et topoclimatique issues des RRP par HER.

Dénomination HER	Nombre de BV considérés	Superficie totale (ha)	% de sols de zones humides	Indice topoclimatique seuil
PYRENEES	16	178235	4,47	18,5
ALPES INTERNES	39	557284	2,04	20,1
MASSIF CENTRAL SUD	73	810443	6,04	9,7
VOSGES	44	202209	11,53	6,9
JURA-PREALPES DU NORD	9	80473	12,06	7,8
MEDITERRANEEN	218	3099439	14,14	7,2
PREALPES DU SUD	76	1086834	4,10	18,5
CEVENNES	63	738293	4,72	18,8
TABLES CALCAIRES	307	3384931	17,24	6,7
COTES CALCAIRES EST	108	1602362	14,03	6,8
CAUSSES AQUITAINS	7	36956	8,22	7,4
ARMORICAIN	291	2863149	30,33	5,4
LANDES	110	699479	35,67	7,6
COTEAUX AQUITAINS	187	1101046	24,23	5,8
PLAINE SAONE	15	346472	47,87	5,5
CORSE	80	874554	0,55	22,9
DEPRESSIONS SEDIMENTAIRES	63	586719	37,10	5,5
ALSACE	113	480149	31,53	6,6
GRANDS CAUSSES	12	126509	2,72	19,9
DEPOTS ARGILLO SABLEUX	31	253713	50,40	5,3
MASSIF CENTRAL NORD	78	954615	11,77	6,7
ARDENNES	<i>Résultats issus des données de l'HER de Plaine de Saône</i>			5,5
TABLES CALCAIRES - HteNP - AC	54	896019	12,71	7,3

4.1.3. Seuillage de la dénivelée au cours d'eau

Le seuillage de la dénivelée au cours d'eau s'appuie sur les **contours des enveloppes approchées d'inondation potentielle simplifiées (EAIP simplifiées) décrites dans le paragraphe 3.4**. Les EAIP simplifiées regroupent pour la plupart des grandes vallées alluviales, des plaines et des marais côtiers. Elles sont présentes sur l'ensemble des HER de niveau 1 en proportion plus ou moins importante.

En utilisant des techniques courantes d'analyse spatiale statistique il est possible d'obtenir des statistiques concernant le contour des EAIP simplifiées. Pour cette étude il a été choisi, pour déterminer le seuil de la dénivelée au cours d'eau par HER, **de s'appuyer sur la moyenne des dénivelées au cours d'eau couvertes par les contours des EAIP simplifiées** de chaque HER. Les pixels ayant une valeur de dénivelée au cours d'eau inférieure au seuil déterminé par HER seront classés en zone humide potentielle.

4.1.4. Seuils de la dénivelée au cours d'eau

Le tableau 3 présente le nombre pixel de dénivelée au cours d'eau du contour des EAIP et la valeur moyenne associée. Les pixels dont les valeurs de dénivelée au cours d'eau sont inférieures à ces seuils seront classés en zone humide potentielle.

Tableau 3 : récapitulatif des données de seuillage de la dénivelée au cours d'eau.

Dénomination HER	Nombre pixel pris en compte sur le contours des EAIP	Dénivelée seuil (moyenne)
PYRENEES	2874	3,66
ALPES INTERNES	8192	7,67
MASSIF CENTRAL SUD	21419	6,82
VOSGES	27347	4,68
JURA-PREALPES DU NORD	107645	7,47
MEDITERRANEEN	242050	4,03
PREALPES DU SUD	22419	6,33
CEVENNES	7832	7,74
TABLES CALCAIRES	769750	3,44
COTES CALCAIRES EST	338570	3,63
CAUSSES AQUITAINS	45164	7,65
ARMORICAIN	116675	2,89
LANDES	17511	2,25
COTEAUX AQUITAINS	337509	2,92
PLAINE SAONE	146695	2,52
CORSE	8044	2,63
DEPRESSIONS SEDIMENTAIRES	86190	2,96
ALSACE	71279	2,84
GRANDS CAUSSES	240	14,45
DEPOTS ARGILO SABLEUX	134353	2,10
MASSIF CENTRAL NORD	42116	3,38
ARDENNES	15179	5,98
TABLES CALCAIRES - HteNP - AC	445303	7,77

4.2. Représentation cartographique des enveloppes intermédiaires

La figure 29 présente l'extension spatiale des milieux potentiellement humides modélisée à partir de l'indice topo-climatique. 10 348 000 ha ont été classés en milieux potentiellement humides soit 18,86% du territoire métropolitain.

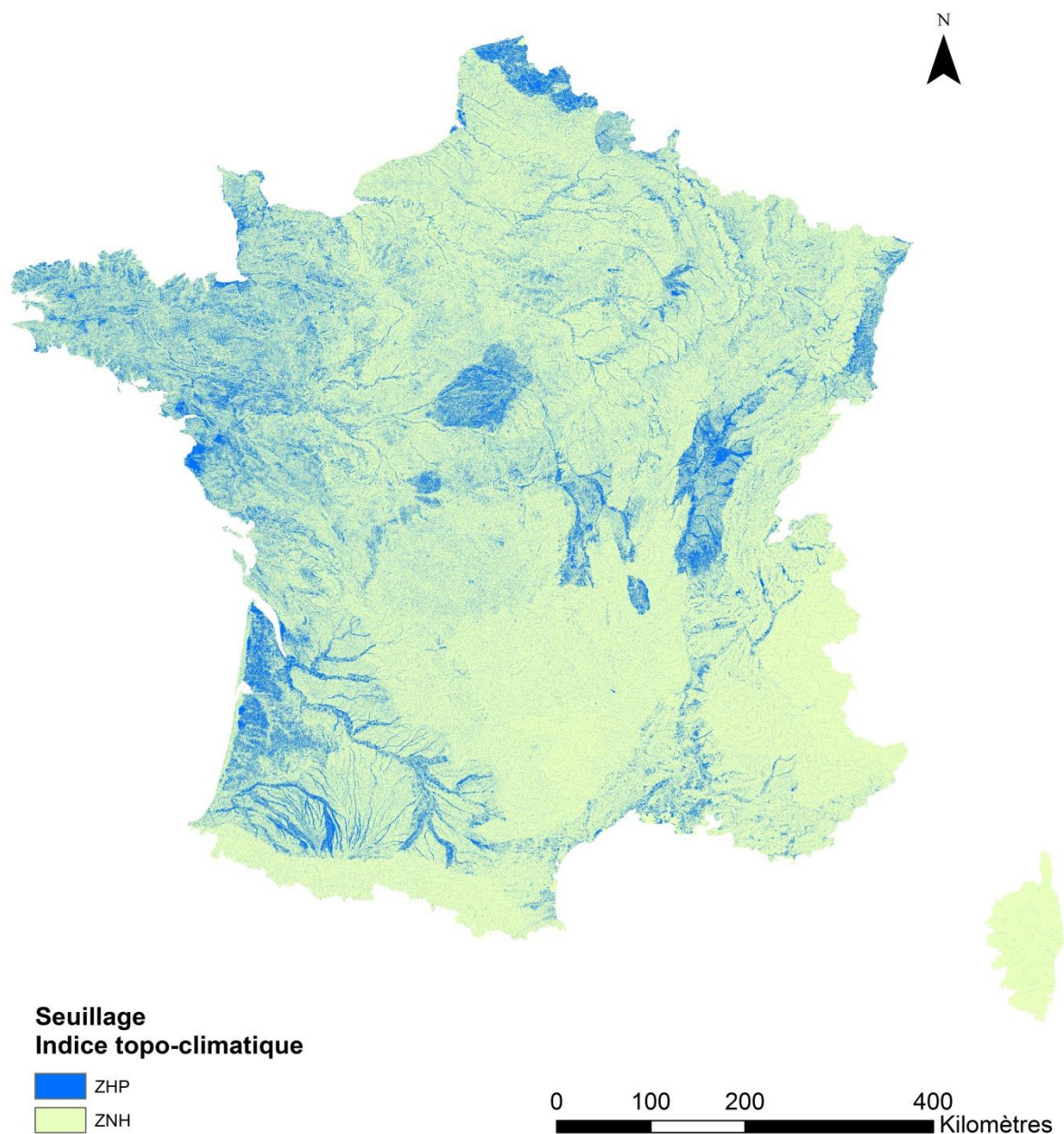


Figure 29 : enveloppes des milieux potentiellement humides issues du seuillage de l'indice topo-climatique.

La figure 30 présente l'extension spatiale des milieux potentiellement humides modélisée à partir de la dénivelée au cours d'eau. 14 232 000 ha ont été classés en milieux potentiellement humides soit 25,9% du territoire métropolitain.

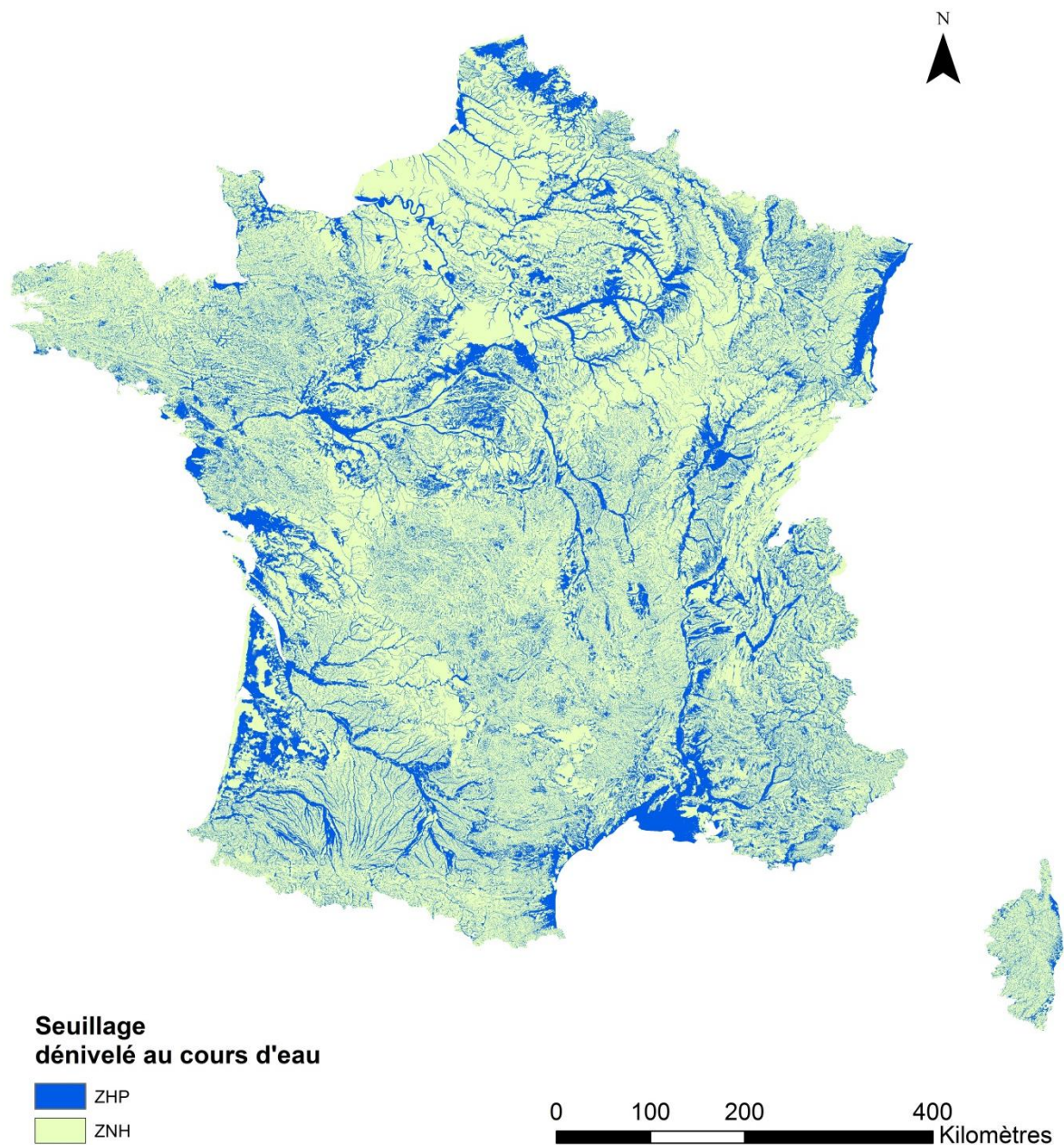


Figure 30 : enveloppes des milieux potentiellement humides issues du seuillage de la dénivelée au cours d'eau.

4.3. Combinaison des enveloppes intermédiaires

La méthodologie de combinaison des enveloppes des milieux potentiellement humides s'appuie sur les hypothèses (tableau 1) concernant des différents indices utilisés selon les situations topographiques et géomorphologiques rencontrées. L'objectif est d'utiliser les délimitations de chacune des enveloppes créées en considérant leur domaine de validité. Le niveau d'infiltrabilité et la classification topographique permettent de discriminer les différentes situations de validité des indices.

4.3.1. Prise en compte du niveau d'infiltrabilité des HER de niveau 2 et des classes de topographie

Afin de caractériser le niveau d'infiltration des HER de niveau 2 en deux classes : HER2 à faible infiltration et HER2 à forte infiltration, la fréquence des différents IDPR a été calculée par HER2. Nous avons considéré comme HER2 à forte infiltration les HER2 dont 70% des pixels ont une valeur d'IDPR inférieur à 1000 (figure 31). Dans ces HER l'indice topo-climatique est inopérant, la dénivelée au cours d'eau est plus appropriée.

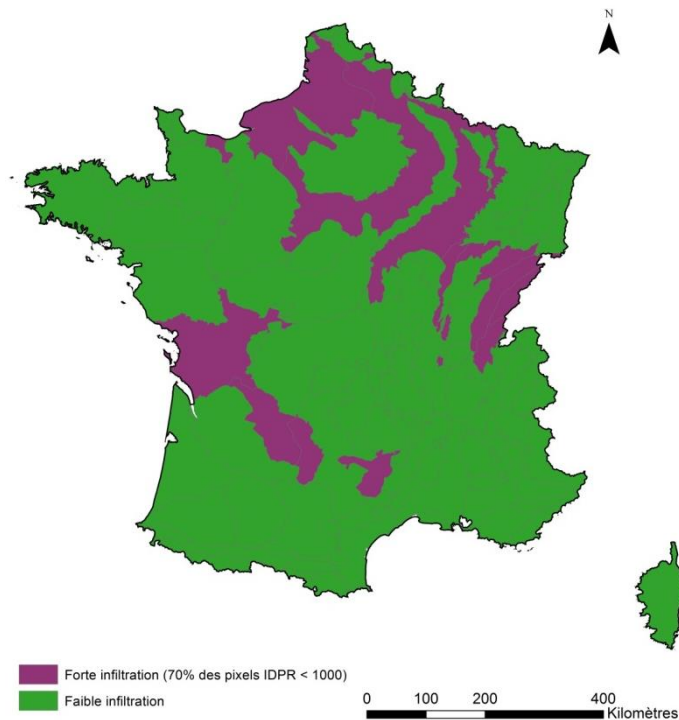


Figure 31 : niveaux d'infiltration des HER de niveau 2.

Sur la base de la classification topographique, les vallées larges, les marais côtiers et les plaines sont distinguées des autres classes topographiques. Dans ces contextes topographiques la dénivelée au cours est plus pertinente que les indices à base topographique pour estimer l'extension spatiale des milieux potentiellement humides.

4.3.2. Clés de combinaison des indices

Pour les besoins de la combinaison, nous utiliserons uniquement les enveloppes issues de la dénivelée au cours d'eau et les enveloppes issues de l'indice topo-climatique. Les clés de combinaison des enveloppes s'appuient sur un nœud principal, le niveau d'infiltrabilité des HER2 et un nœud secondaire, la classification topographique (figure 32).

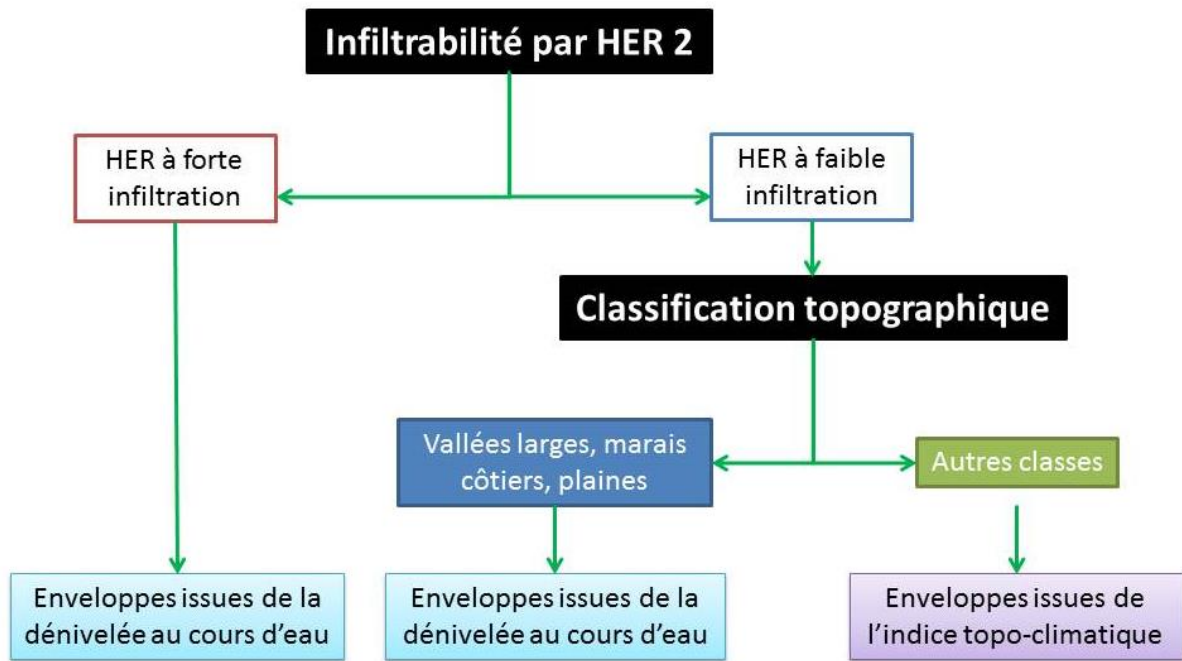


Figure 32 : clés de combinaison utilisant l'infiltrabilité des HER et une classification topographique.

4.4. Représentation cartographique des enveloppes finales des milieux potentiellement humides

La figure 33 présente l'extension spatiale des milieux potentiellement humides après combinaison des enveloppes des milieux potentiellement humides issues de l'indice topo-climatique et de la dénivelée au cours d'eau selon les règles de combinaison décrites au paragraphe 4.2. En considérant la surface réelle par pixel (fonction de la pente) et des plans d'eau de la BD CARTHAGE, 12 987 000 ha ont été classés en milieux potentiellement humides soit approximativement 23,2% du territoire métropolitain.

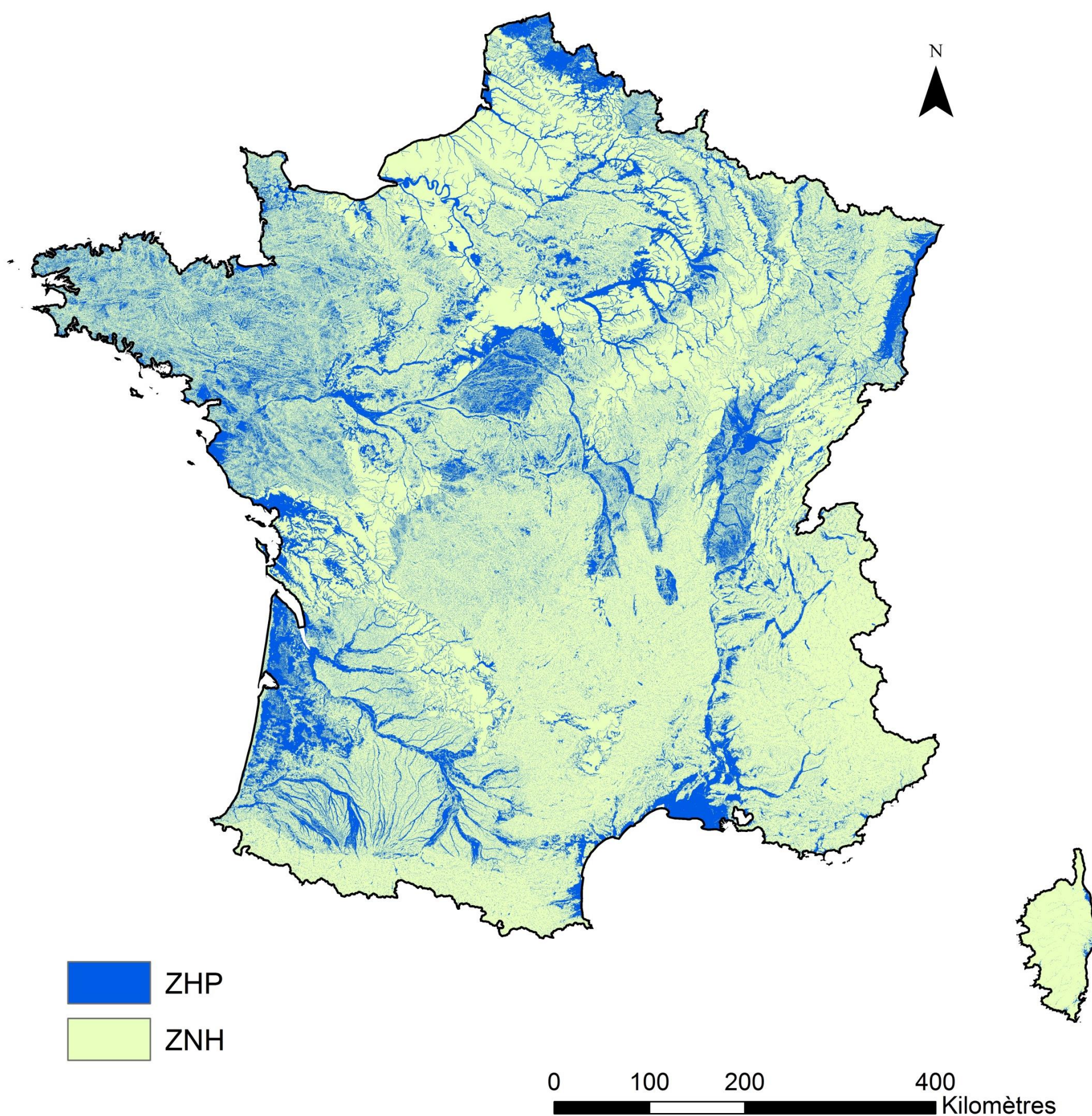


Figure 33 : enveloppes finales des milieux potentiellement humides.

5. Elaboration de classes de confiance au sein des enveloppes des milieux potentiellement humides

L'objectif est d'attribuer un indice de probabilité à chaque pixel au sein des enveloppes des milieux potentiellement humides créées, afin d'introduire une notion de probabilité de présence (importante à très forte) en complément des enveloppes de présence / absence des milieux potentiellement humides.

Les enveloppes sont composées de différents indices, calibrés par HER de niveau 1. Afin de calculer un indice de probabilité unique au sein des enveloppes, il est nécessaire d'individualiser le traitement portant sur la dénivelée au cours d'eau de celui portant sur l'indice topo-climatique.

5.1. Création de l'indice de confiance pour les pixels des enveloppes seuillés à partir de la dénivelée au cours d'eau

Plus la dénivelée au cours est faible, plus la probabilité est forte d'être en présence d'une zone humide. Le calcul de l'indice de probabilité s'appuie sur la valeur seuil de la dénivelée au cours d'eau définie pour chaque HER de niveau 1 et sur les valeurs des pixels de la dénivelée au cours d'eau inclus dans les enveloppes, selon la formule suivante :

$$IC_{DC_{x,y}} = \frac{(DC_{\text{seuil de l'HER}} - DC_{x,y})}{DC_{\text{seuil de l'HER}}} \times 100$$

Avec DC : dénivelée au cours d'eau et IC : indice de confiance

L'indice varie de 0 à 100. Plus il est élevé, plus la probabilité d'être en présence d'une ZHP au sein de l'enveloppe est forte (figure 34).

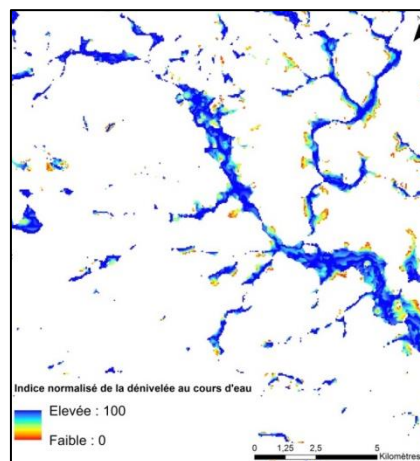


Figure 34 : indice normalisé de la dénivelée au cours d'eau au sein des enveloppes.

5.2. Création de l'indice de confiance pour les pixels des enveloppes seuillés à partir de l'indice topo-climatique

Plus l'indice topo-climatique est élevé, plus la probabilité est forte d'être en présence d'une zone humide. Le calcul de l'indice de probabilité normalisé s'appuie d'une part sur la valeur seuil de l'indice

topo-climatique, la valeur maximale de l'indice topo-climatique de chaque HER de niveau 1 et d'autre part sur les valeurs de l'indice topo-climatique des pixels inclus dans les enveloppes selon la formule suivante :

$$IC\ ITC_{x,y} = \frac{(ITCmaxHER - ITCseuil\ HER) - (ITCmax\ de\ l'HER - ITC\ x,y)}{(ITCmax\ HER - ITCseuilHER)} \times 100$$

Avec *ITC* : indice topo-climatique et *IC* : indice de confiance

L'indice varie de 0 à 100. Plus il est élevé, plus la probabilité d'être en présence d'une ZHP au sein de l'enveloppe est forte (figure 35).

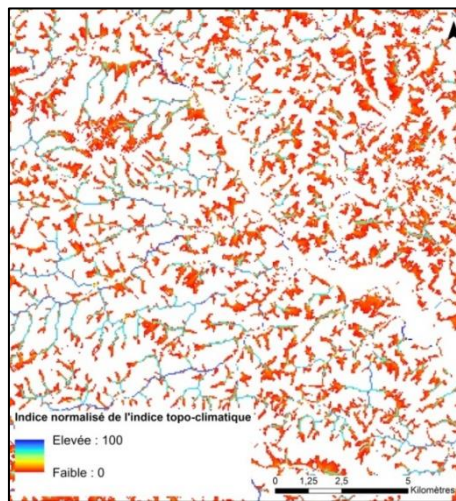


Figure 35 : indice normalisé de l'indice topo-climatique au sein des enveloppes.

5.3. Classification de l'indice de confiance en 3 classes

Les indices normalisés de la dénivelée au cours d'eau et de l'indice topo-climatique sont assemblés. Une étude de la distribution fréquentielle de cet indice est menée par HER de niveau 1 afin de déterminer pour chaque HER les bornes de 3 classes (de taille égale) correspondant à 3 classes de probabilité de présence d'une zones humides au sein des enveloppes des milieux potentiellement humides.

Les indices de confiance de chaque HER sont découpés selon 3 classes consécutives au moyen d'un jeu de 2 quantiles (quantile 33,3% et 66,7%), à ces limites s'ajoutent les bornes inférieure et supérieure du domaine d'échantillonnage (0 et 100) - (Annexe 3).

5.4. Représentation cartographique des indices de confiance au sein des enveloppes

La figure 36 présente le détail des 3 classes de confiance concernant l'existence d'un milieu potentiellement humide. Les estrans (source : SHOM) et les plans d'eau ont été intégrés (BD CARTHAGE-SANDRE, 2014).

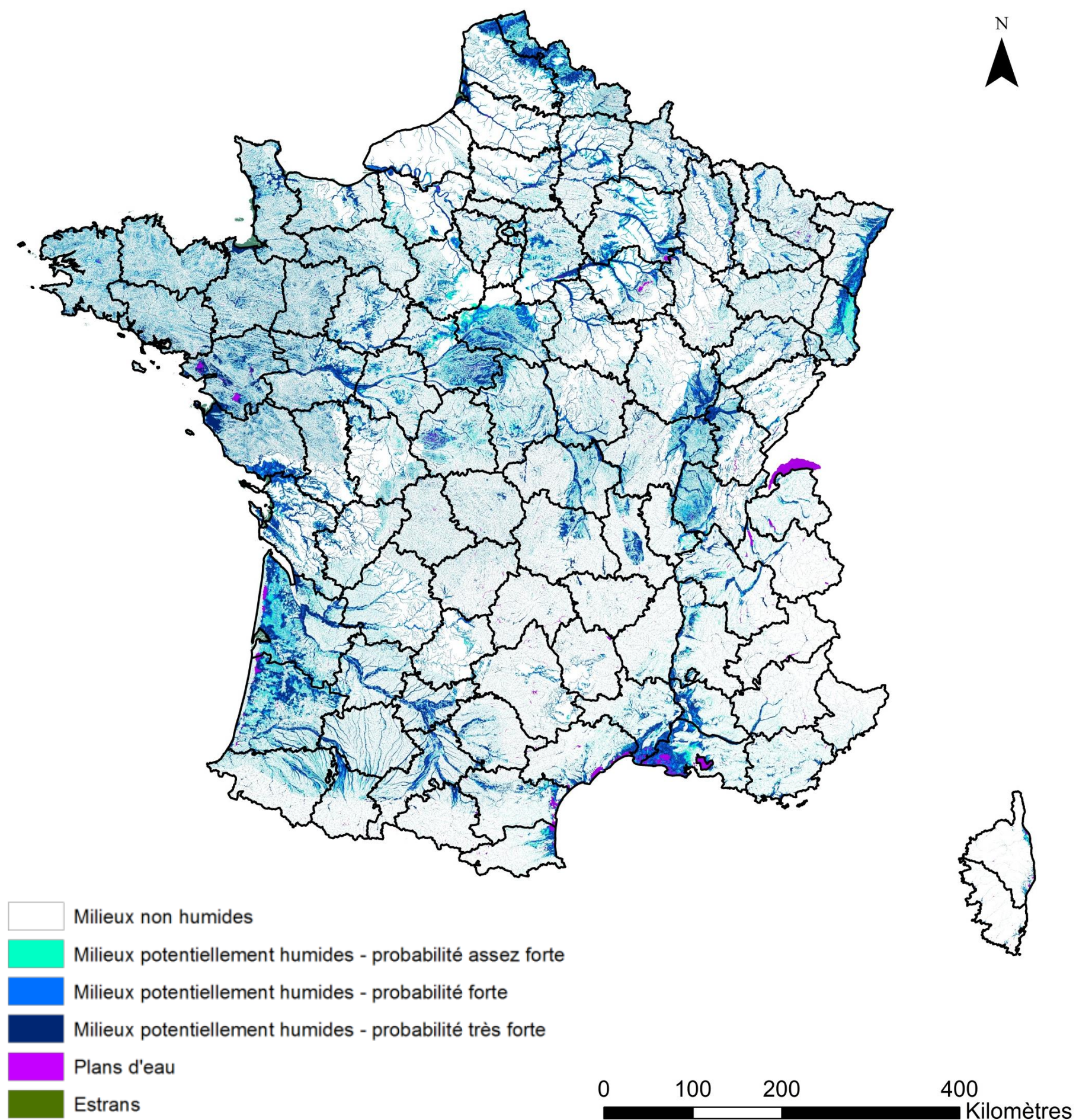


Figure 36 : cartographie nationale des milieux potentiellement humides associés à 3 classes de confiance.

6. Validation

Il est à noter que nous effectuons cette démarche de validation à l'aide de données ponctuelles classés en zones non humides ou en **zones humides effectives**. Les enveloppes des milieux potentiellement humides de fait sont plus larges que des enveloppes de zones humides effectives. Les résultats concernant les erreurs de commission (proportion de points modélisés en milieu potentiellement humides alors que l'observation montre qu'ils ne sont pas caractéristiques de zones humides) seront en conséquence importants. Ces fortes erreurs peuvent être attribuées conjointement à :

- Des erreurs liées au modèle qui ne prend pas en compte tous les paramètres de formation des zones humides et dont la précision est limitée par la résolution des données d'entrée
- Des zones humides qui ont perdu leur caractère humide par des actions de mise en valeur dans le passé (drainage, assèchement)
- L'hétérogénéité de la distribution des données de validation

6.1. Matrice de confusion et indicateurs statistiques

Les résultats de validation s'appuient sur l'établissement de matrices de confusion qui comparent pour chaque point ou pixel, la classe modélisée à la classe observée (tableau 4).

Tableau 4 : matrice de confusion indiquant le nombre de points des zones humides et des zones non humides bien classés lors de la superposition des données pédologiques ponctuelles de validation.

		Données pédologiques ponctuelles de validation	
		Zone humide effective (ZHE)	Zone non humide (ZNH)
Modélisation ZHP France	Zone humide potentielle (ZHP)	6301	21020
	Zone non humide (ZNH)	14017	87932

A partir de la matrice de confusion les indices suivants ont été calculés :

- Le pourcentage d'accord brut (PAB) :

$$PAB = \frac{\text{Nombre de points en ZHP et ZNH bien classés en ZHE et ZNH}}{\text{Nombre total de points}}$$

- Le pourcentage de classement correct des zones humides (PZHbc) :

$$PZHcc = \frac{\text{Nombre de points bien classés en ZHP}}{\text{Nombre de points de validation en ZHE}}$$

- L'erreur de commission sur le classement en zone humide potentielle (EZHPmc) :

$$EZHPmc = \frac{\text{Nombre de points modélisé en ZHP mal classé}}{\text{Nombre de points modélisé en ZHP}}$$

- Le coefficient Kappa compare l'erreur obtenue par la modélisation réalisée à l'erreur obtenue par une classification réalisée au hasard. Un coefficient de Kappa de 0,2 signifie que 20% des classifications correctes ne sont pas dues au hasard.

6.2. Validation France entière

6.2.1. Apport de la combinaison des indices (introduction de la dénivelée au cours d'eau)

La combinaison des enveloppes issues de la dénivelée au cours d'eau et de l'indice topo-climatique apporte un gain conséquent en comparaison avec l'utilisation des enveloppes basées uniquement sur l'indice-topo-climatique (tableau 5). Bien que le pourcentage d'accord brut (PAB) soit légèrement inférieur (67,9%) le pourcentage de classement correct des zones humides (PZHcc) est significativement supérieur (54,7%) et l'erreur de commission est sensiblement inférieure (74,4%).

Tableau 5 : indicateurs statistiques de validation pour la comparaison des enveloppes issues l'indice topo-climatique et de la combinaison entre l'indice topo-climatique et la dénivelée au cours d'eau.

	PAB	PZHcc	EZHPmc	Kappa
Enveloppes issues de l'indice topo-climatique	73,3	30,8	76,5	0,11
Enveloppes combinées (introduction de la dénivelée)	67,9	54,7	74,4	0,17

Les gains liés à l'introduction de la dénivelée au cours d'eau s'observent notamment dans les vallées étroites, les vallées larges, les plaines et les marais côtiers (tableau 6). Le pourcentage de sols de zones humides bien classés reste similaire dans les autres situations.

Tableau 6 : comparaison des pourcentages de classement correct des zones humides par classe topographique entre les enveloppes issues de l'indice topo-climatique et celles issues de la combinaison entre de l'indice topo-climatique et la dénivelée au cours d'eau.

Positionnement topographique	PZHcc Enveloppes issues de l'indice topo-climatique	PZHcc Enveloppes combinées (introduction de la dénivelée)
Vallée	4,3	5
Pente < 2%, plateau	5,1	4,8
Pente > 2%	4,58	4,5
Sommet versant convexe	0,01	0,02
Vallée large, plaine, marais côtier	16,9	40,3

6.3. Eléments de validation par HER

Le tableau 7 présente l'ensemble des indicateurs statistiques calculés à partir des 130 000 informations pédologiques ponctuelles, par HER de niveau 1. Les pourcentages d'accord brut (PAB)

sont globalement satisfaisants sauf pour les **HER de la Plaine de Saône et des dépôts argilo-sableux** (avec respectivement un pourcentage d'accord brut de 47,5% et 40,5%). En se focalisant sur le pourcentage de classement correct des zones humides (PZHcc), la prédiction des zones humides semble peu pertinente pour les **HER des Pyrénées, du Massif central, des Alpes et des Préalpes**.

Tableau 7 : indicateurs statistiques de validation par HER de la combinaison entre l'indice topoclimatique et la dénivelée au cours d'eau, calculés à partir des données pédologiques ponctuelles disponibles dans la base de données DoneSol.

HER	Nombre de points de validation	Proportion de points en ZH (%)	PAB (%)	PZHcc (%)	EZHPmc (%)	Indice Kappa
ALSACE	616	31,8	67,5	81,6	50,6	0,362
MEDITERRAN EEN	2479	15,4	73,1	80,6	65,8	0,336
GRANDS CAUSSES	140	3,6	89,3	80	77,8	0,309
LANDES	5044	41,0	57,9	73,9	50,9	0,192
TABLES CALCAIRES - HteNP - AC	24973	4,5	69,6	63,8	90,9	0,0873
PLAINE SAONE	695	25,8	47,5	63,1	72,6	0,036
DEPOTS ARGILO SABLEUX	5961	17,2	40,5	60,4	83,5	-0,015
ARMORICAIN	11642	23,3	76,2	59,7	50,9	0,38
COTEAUX AQUITAINS	7419	15,8	61,1	59,5	77,6	0,125
DEPRESSIONS SEDIMENTAIRES	1213	16,9	55,8	55,1	79,7	0,065
ARDENNES	27	14,8	63	50	80	0,093
CORSE	12556	28,7	71,5	49,9	49,7	0,301
TABLES CALCAIRES	38343	14,4	63,5	48	80,8	0,086
COTES CALCAIRES EST	9184	10,2	81,6	47,4	73	0,246
VOSGES	951	5,5	89,8	46,2	74,2	0,28
CAUSSES AQUITAINS	510	14,9	79,6	40,8	65,6	0,252
JURA- PREALPES DU NORD	1277	11,4	77,7	39	77,5	0,164
CEVENNES	539	3,5	95,4	31,6	66,7	0,3
ALPES INTERNES	251	11,6	89,6	27,6	38,5	0,333

HER	Nombre de points de validation	Proportion de points en ZH (%)	PAB (%)	PZHcc (%)	EZHPmc (%)	Indice Kappa
PREALPES DU SUD	286	9,8	87,8	25	66,7	0,22
MASSIF CENTRAL NORD	2926	21,0	77,2	24,7	57,4	0,187
MASSIF CENTRAL SUD	1884	10,4	84,34	24,5	75,4	0,158
PYRENEES	359	11,4	85,2	14,6	75	0,109

Dans les **HER des Pyrénées, du Massif central, des Alpes et des Préalpes** l'utilisation d'un indice topo-climatique combiné à la dénivelée au cours pour déterminer l'extension spatiale des milieux potentiellement humides **semble peu fiable** et conduit en première approche à sous-estimer fortement leur extension spatiale et ceci pour plusieurs raisons :

- Pour les HER des Alpes et des Pyrénées Les données pédologiques au 1/250 000 ne permettent de détecter que des pourcentages très faibles de sols de zones humides notamment dans les Alpes (2%). Les données pédologiques complémentaires au 1/250 000 des départements de l'Isère, de Savoie et de Haute-Savoie (en cours de réalisation) pourraient permettre d'affiner l'estimation du pourcentage de sols de zones humides par la méthode de seuillage de l'indice topo-climatique.
- Les zones humides de pente (tourbières de pente) qui se sont développées à la faveur de profils topographiques spécifiques (pente incurvée) sont rarement détectées par les indices topographique ou même topo-climatique. D'autres techniques de modélisation (apprentissage) ou des approches par expertises doivent être envisagées.
- La résolution de 50 mètres du MNT utilisée peut être limitante dans ces zones où les variations de pente sont importantes sur de faibles distances.

Plus généralement dans les HER de niveau 1 (Plaine de Saône notamment) qui présentent une proportion importante de sols hydromorphes en position de plateau les enveloppes créées ne captent pas ces zones humides et sur-estiment l'extension spatiale des zones humides des vallées. La méthode de seuillage utilisée répartit la proportion des sols hydromorphes de plateau (où l'indice topo-climatique est généralement faible) dans les positions topographiques où l'indice est généralement plus élevé (fond de vallées).

Conclusion

Une méthode nationale de modélisation des milieux potentiellement humides a été développée avec des données de base exhaustives et homogènes au niveau de territoire métropolitain. La stratification de la zone d'étude en hydro-écorégions a permis d'intégrer non seulement les grandes variations climatiques, géologiques et topographiques mais aussi le concept de masse d'eau.

La méthode mise au point a conduit à la définition d'enveloppes des milieux potentiellement humides, correspondant aux secteurs qui, selon les critères géomorphologiques et climatiques, devraient présenter les caractéristiques de zones humides. La méthode ne considère pas les aménagements ni les processus pédologiques et hydrologiques spécifiques qui limiteraient le caractère effectif de ces zones.

Les enveloppes produites sont basées sur la combinaison de deux indices : l'indice topo-climatique qui permet de bien caractériser les versants de bassins versants d'ordres faibles et la dénivelée au cours d'eau, qui permet de bien caractériser les zones karstiques, les marais côtiers et grandes vallées fluviales. Cependant un certains nombres de situations restent problématiques notamment les zones humides de pente. Cette méthode de combinaison d'indices est originale pour prédire les milieux potentiellement humides et permet de tenir compte des spécificités des milieux et des zones humides qui s'y développent.

Cette étude a permis également de quantifier un indice de confiance au sein des enveloppes des milieux potentiellement humides pouvant faciliter l'interprétation des résultats et l'utilisation opérationnelle de cette carte dans le cadre des démarches de pré-délimitation, d'inventaires opérationnels de zones humides.

Ce travail ambitieux a conduit à la première estimation de l'extension spatiale des milieux potentiellement humides au niveau national, cependant quelques pistes d'amélioration peuvent être proposées :

- La répartition non homogène sur chaque HER de niveau 1 des données pédologiques utilisées pour seuiller les indices pourrait être compensée :
 - En envisageant le calage des indices avec des données pédologiques à grande échelle (1/25 000 à 1/5 000) supplémentaires. Suite à l'estimation d'un pourcentage de couverture de l'HER par une étude pédologique à grande échelle, des études pédologiques supplémentaires peuvent potentiellement être numérisées afin de pouvoir recalculer et caler les seuils de l'indice topo-climatique. Le temps de travail nécessaire serait important, pour une amélioration potentielle des résultats difficile à estimer. L'extension spatiale de ces études devra en outre être compatible avec des entités hydrologiques cohérentes (petits bassins versants).
 - Par la prise en compte des nouveaux Référentiels Régionaux Pédologiques validés. La meilleure couverture du territoire métropolitain par des études vectorisées au format DoneSol pourrait également permettre un découpage plus fin et donc plus caractéristique du territoire. Pour l'instant ces données ne sont pas disponibles. Lorsqu'elles le seront, il s'agira alors d'appliquer de nouveau les requêtes développées dans le cadre de ce projet, ce qui ne représente pas un temps de travail très important.

- En identifiant les sols de zones humides situés en position de plateau afin de ne pas les prendre en compte pour le calage des indices qui sont inopérants dans cette position.
- Les améliorations suivantes de l'indice topo-climatique utilisé sont envisageables :
 - Lisser le modèle numérique de terrain utilisé sur les plaines et basses altitudes dont la résolution métrique en altitude engendre des phénomènes de « marche » et crée des pentes parfois fortes qui n'existent pas.
 - Adopter un modèle numérique de terrain plus précis (en X, Y et Z), permettant de détecter des microreliefs pouvant favoriser la présence de zones humides localisées.
- Un découpage plus fin du territoire toujours basé sur le concept des HER pourrait être mis en œuvre à l'échelon régional ou départemental :
 - L'utilisation de la stratification en HER du territoire métropolitain au niveau 2 permet d'envisager une meilleure calibration des indices utilisés plus adaptée à des contextes caractéristiques (pluviométrie forte, domaines géomorphologiques contrastés). Cependant, nous sommes pour l'instant confrontés au manque de données pédologiques pour seuiller l'indice topo-climatique dans chaque HER de niveau 2.

Bibliographie

- Aurousseau, P., et H. Squidant. 1995. Rôle environnemental et identification cartographique des sols hydromorphes de bas-fonds. *Ingénieries-EAT* (n° spécial rade de Brest): 75-85.
- Beven, K.J., et M.J. Kirkby. 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin* 24(1): 43-69.
- Beyer, H.L. 2012. *Geospatial Modelling Environment* (Version 0.7.2.1). (software). URL: <http://www.spatial ecology.com/gme>.
- InfoSol. 2013. Dictionnaire de données - DoneSol version 3.4. INRA, US 1106 InfoSol, Orléans, France. 408 pages + annexes.
- Jenness, J., B. Brost et P. Beier. 2013. *Land Facet Corridor Designer: Extension for ArcGIS*. Jenness Enterprises. Available at: http://www.jennessent.com/arcgis/land_facets.htm.
- Mardhel, V., P. Frantar, J. Uhan et A. Moi. 2004. Index of development and persistence of the river networks as a component of regional groundwater vulnerability assessment in Slovenia. *Int. Conf. groundwater vulnerability assessment and mapping*. Ustron, Poland, 15-18 June 2004., Poland.
- MEDDE et GIS Sol. 2012. Guide pour l'identification et la délimitation des sols de zones humides. Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, Groupement d'Intérêt Scientifique Sol. 63 pages.
- MEDDE, 2011. EPRI. Mieux savoir pour agir - Principaux enseignements de la première évaluation des risques d'inondation sur le territoire français: 67 pages.
- Merot, P. et al. 2000. Ty-fon : Typologie fonctionnelle des zones humides de fonds de vallée en vue de la régulation de la pollution diffuse. INRA, Rennes. 115 pages.
- Merot, P., B. Ezzahar, C. Walter, et P. Aurousseau. 1995. Mapping waterlogging of soils using digital terrain models. *Hydrol. Process.* 9(1): 27-34.
- Merot, P., L. Hubert-Moy, C. Gascuel-Oudou, B. Clement, P. Durand, J. Baudry, et C. Thenail. 2006. A method for improving the management of controversial wetland. *Environmental management* 37(2): 258-270.
- Merot, P., H. Squidant, P. Aurousseau, M. Hefting, T. Burt, V. Maitre, M. Kruk, A. Butturini, C. Thenail, et V. Viaud. 2003. Testing a climato-topographic index for predicting wetlands distribution along an European climate gradient. *Ecological Modelling* 163(1): 51-71.
- Wasson, J.-G., A. Chandresris, H. Pella, et L. Blanc. 2002. les hydro-écorégions de France métropolitaine - approche régionale de la typologie des eaux courantes et éléments pour la définition des peuplements de référence d'invertébrés. Cemagref - Ministère de l'écologie et du développement durable. 73 pages + annexes.
- Wasson, J.-G., A. Chandresris, H. Pella, et L. Blanc. 2004. les hydro-écorégions : une approche fonctionnelle de la typologie des rivières pour la Directive cadre européenne sur l'eau. *Ingénieries-EAT* (40): 3-10.

Liste des figures

<i>Figure 1 : représentation de l'organisation des zones humides selon l'approche PEE (d'après Mérot et al., 2006).</i>	2
<i>Figure 2 : ordinogramme général de la méthodologie employée.</i>	3
<i>Figure 3 : Hydro-écorégions de niveau 1 (à gauche) et de niveau 2 (à droite).</i>	4
<i>Figure 4 : MNT de l'IGN de la France métropolitaine au pas de 25 m (BD TOPO®, IGN, 2012).</i> 5	
<i>Figure 5 : pluies efficaces annuelles entre 1999 et 2008 spatialement interpolées (données Météo France).</i>	6
<i>Figure 6 : exemple de délimitation en Unités Cartographiques de Sols (UCS) comprenant chacune plusieurs Unités Typologiques de Sols (UTS) [©M. Bornand Inra Montpellier].</i>	7
<i>Figure 7 : matériau dominant de la BDGSF par unité cartographique de sols.</i>	8
<i>Figure 8 : Référentiels Régionaux Pédologiques au 1/250 000 disponibles pour la méthode de seuillage et estimation de la proportion de zones humides par UCS. *Les pourcentages en région Corse ont été déterminés par expertise.</i>	9
<i>Figure 9 : répartition des données pédologiques ponctuelles de validation.</i>	10
<i>Figure 10 : zones hydrographiques du 4ème ordre, SANDRE, 2013.</i>	11
<i>Figure 11 : cours d'eau de la BD CARTHAGE, SANDRE.</i>	11
<i>Figure 12 : cartographie de l'indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR).</i>	13
<i>Figure 13 : exemple de modèle de drainage monodirectionnel et multidirectionnel (Arousseau et Squidant, 1995).</i>	15
<i>Figure 15 : indice topo-climatique France entière calculé à partir du modèle numérique de terrain au pas de 50 mètres et les données de pluie efficace du modèle SAFRAN interpolées et restituées à un pas de 50 mètres.</i>	16
<i>Figure 16 : classes d'hydromorphie (GEPPA 1981 ; modifié). Les classes Vb, Vc, Vd, VI, H correspondent à des sols de zones humides ; les classes IVd et Va et les types de sols correspondants peuvent être exclus par le préfet de région après avis du conseil scientifique régional du patrimoine naturel.</i>	17
<i>Figure 17 : représentation schématique de la requête globale sélectionnant les sols de zone humide, non-humide ou les cas particuliers. (g : traits rédoxiques et/ou réductiques ; Gr : horizon réductique, Go : horizon réductique à réoxydation temporaire).</i>	18
<i>Figure 18 : représentation des liaisons et champs de liaison entre les différentes tables utilisées.</i>	18

<i>Figure 19 : regroupement des UTS des sols des zones humides (SZH) au sein des UCS complexes, et calcul de leurs pourcentages (% des SZH).</i>	19
<i>Figure 20 : extension spatiale des bassins versants retenus, couverts complètement par une étude pédologique au 1/250 000.</i>	19
<i>Figure 21 : croisement géographique de la couche pédologique avec celle des bassins versants (a) et les sommes des pourcentages des UTS des sols humides au sein des UCS complexes (b).</i>	20
<i>Figure 22 : étape de calcul permettant d'estimer la superficie des sols de zones humides par bassin versant.</i>	20
<i>Figure 23 : calcul final permettant d'estimer le pourcentage de sols de zones humides par bassin versant.</i>	20
<i>Figure 24 : HER de niveau 1 modifiées après prise en compte d'une HER de niveau 2.</i>	21
<i>Figure 25 : EAIP simplifiées France entière.</i>	22
<i>Figure 26 : dénivelée au cours d'eau calculée à partir du MNT au pas de 50 m et du réseau hydrographique de la BD CARTHAGE® (IGN, 2012 ; SANDRE, 2013).</i>	23
<i>Figure 27 : classification topographique du territoire en 5 classes.</i>	24
<i>Figure 28 : fréquences cumulées de l'indice topographique aval de 6 HER.</i>	25
<i>Figure 29 : enveloppes des milieux potentiellement humides issues du seuillage de l'indice topo-climatique.</i>	28
<i>Figure 30 : enveloppes des milieux potentiellement humides issues du seuillage de la dénivelée au cours d'eau.</i>	29
<i>Figure 31 : niveaux d'infiltration des HER de niveau 2.</i>	30
<i>Figure 32 : clés de combinaison utilisant l'infiltrabilité des HER et une classification topographique.</i>	31
<i>Figure 33 : enveloppes finales des milieux potentiellement humides.</i>	32
<i>Figure 34 : indice normalisé de la dénivelée au cours d'eau au sein des enveloppes.</i>	33
<i>Figure 35 : indice normalisé de l'indice topo-climatique au sein des enveloppes.</i>	34
<i>Figure 36 : cartographie nationale des milieux potentiellement humides associés à 3 classes de confiance.</i>	35

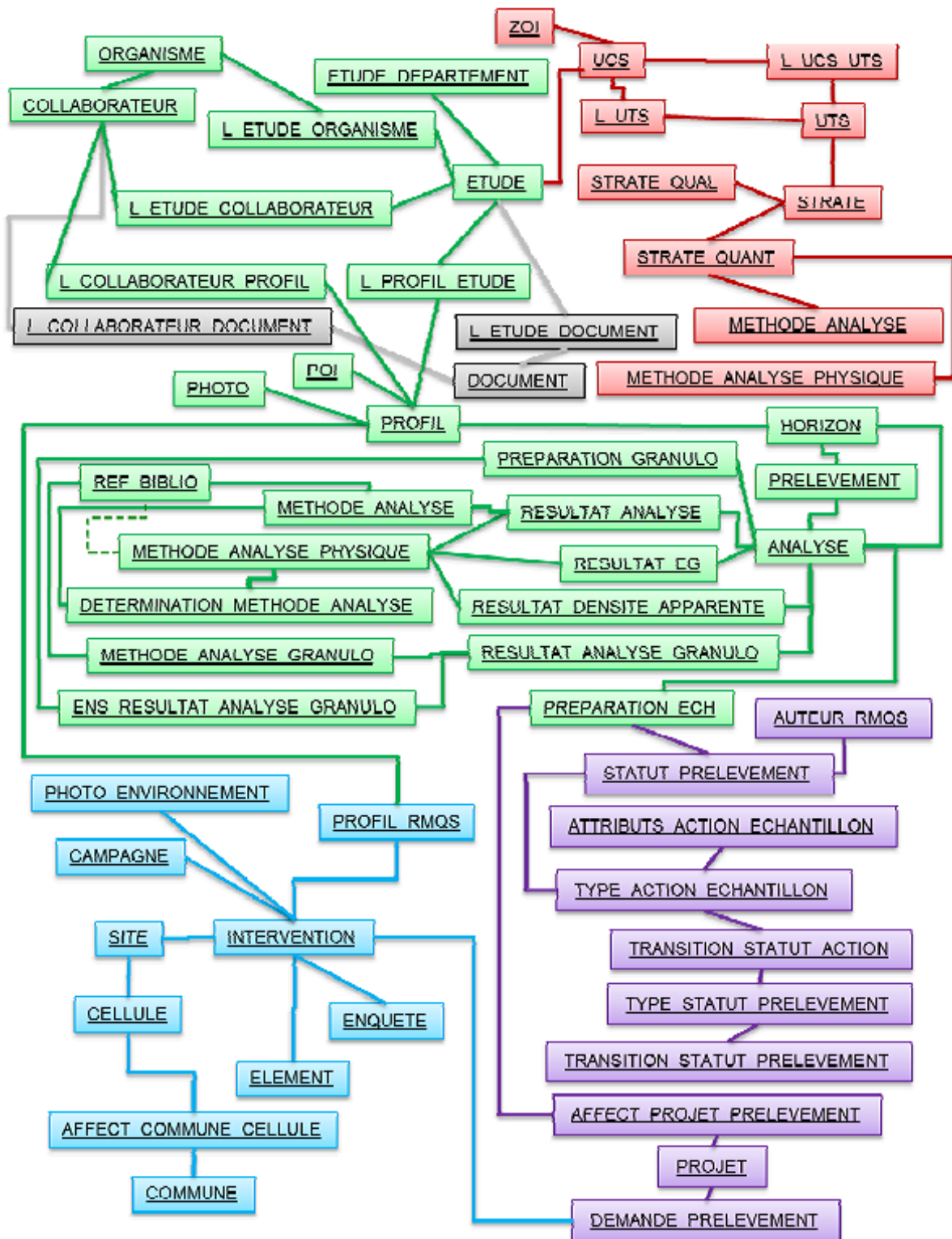
Liste des tableaux

<i>Tableau 1 : pertinence définie a priori d'un indice topographique et des enveloppes approchées d'inondation potentielle pour prédire les milieux potentiellement humides.</i>	<i>3</i>
<i>Tableau 2 : récapitulatif des paramètres de seuillage des indices topographique aval et topo-climatique issues des RRP par HER.....</i>	<i>26</i>
<i>Tableau 3 : récapitulatif des données de seuillage de la dénivelée au cours d'eau.....</i>	<i>27</i>
<i>Tableau 4 : matrice de confusion indiquant le nombre de points des zones humides et des zones non humides biens classés lors de la superposition des données pédologiques ponctuelles de validation.....</i>	<i>36</i>
<i>Tableau 5 : indicateurs statistiques de validation pour la comparaison des enveloppes issues l'indice topo-climatique et de la combinaison entre l'indice topo-climatique et la dénivelée au cours d'eau.</i>	<i>37</i>
<i>Tableau 6 : comparaison des pourcentages de classement correct des zones humides par classe topographique entre les enveloppes issues de l'indice topo-climatique et celles issues de la combinaison entre de l'indice topo-climatique et la dénivelée au cours d'eau.</i>	<i>37</i>
<i>Tableau 7 : indicateurs statistiques de validation par HER de la combinaison entre l'indice topo-climatique et la dénivelée au cours d'eau, calculés à partir des données pédologiques ponctuelles disponibles dans la base de données DoneSol.</i>	<i>38</i>

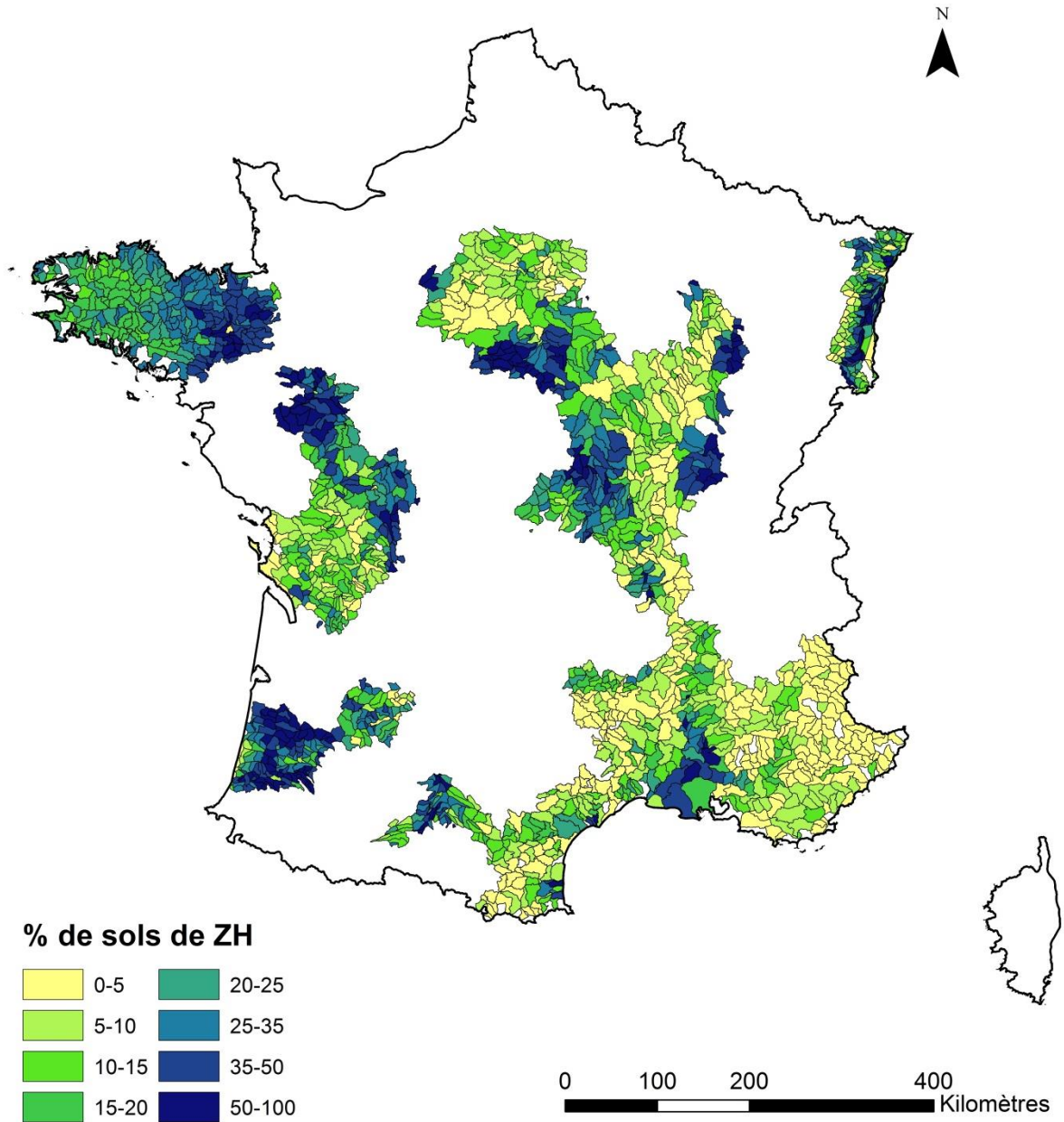
Liste des annexes

<i>Annexe 1 : schéma conceptuel général du modèle de données DoneSol.....</i>	<i>47</i>
<i>Annexe 2 : proportion de sols de zones humides par bassin versant estimés à partir des bases de données sols des RRP à 1/250 000.</i>	<i>48</i>
<i>Annexe 3 : tableau récapitulatif par HER des pourcentages de sols hydromorphes estimés, du pourcentage de milieux potentiellement humides modélisés, des seuils des indices et des intervalles pour l'établissement de classes de confiance.....</i>	<i>49</i>

Annexe 1 : schéma conceptuel général du modèle de données DoneSol.



Annexe 2 : proportion de sols de zones humides par bassin versant estimés à partir des bases de données sols des RRP à 1/250 000.



Annexe 3 : tableau récapitulatif par HER des pourcentages de sols hydromorphes estimés, du pourcentage de milieux potentiellement humides modélisés, des seuils des indices et des intervalles pour l'établissement de classes de confiance.

HER	% de sols de zones humides estimés	Indice topo-climatique seuil	Dénivelée seuil (moyenne)	% ZHP modélisées	Intervalle de l'indice de confiance pour la classe 1 de probabilité	Intervalle de l'indice de confiance pour la classe 2 de probabilité	Intervalle de l'indice de confiance pour la classe 3 de probabilité
PYRENEES	4,47	18,5	3,66	5,69	0 - 14,67	14,67 - 42,33	42,33 - 100
ALPES INTERNES	2,04	20,1	7,67	2,69	0 - 14,67	14,67 - 47,67	47,67 - 100
MASSIF CENTRAL SUD	6,04	9,7	6,82	7,03	0 - 50,33	50,33 - 65	65 - 100
VOSGES	11,53	6,9	4,68	13,08	0 - 9,33	9,33 - 65,67	65,67 - 100
JURA-PREALPES DU NORD	12,06	7,8	7,47	17,73	0 - 55	55 - 93,67	93,67 - 100
MEDITERRANEEN	14,14	7,2	4,03	28,99	0 - 61,67	61,67 - 91	91 - 100
PREALPES DU SUD	4,1	18,5	6,33	5,17	0 - 12,33	12,33 - 39,67	39,67 - 100
CEVENNES	4,72	18,8	7,74	5,39	0 - 13	13 - 35,33	35,33 - 100
TABLES CALCAIRES	17,24	6,7	3,44	26,60	0 - 45,33	45,33 - 86	86 - 100
COTES CALCAIRES EST	14,03	6,8	3,63	15,94	0 - 53,33	53,33 - 96	96 - 100
CAUSSES AQUITAINS	8,22	7,4	7,65	14,65	0 - 59,67	59,67 - 99,33	99,33 - 100
ARMORICAIN	30,33	5,4	2,89	36,38	0 - 3	3 - 36,67	36,67 - 100
LANDES	35,67	7,6	2,25	55,22	0 - 32,67	32,67 - 71,33	71,33 - 100
COTEAUX AQUITAINS	24,23	5,8	2,92	29,97	0 - 9,67	9,67 - 75,67	75,67 - 100
PLAINE SAONE	47,87	5,5	2,52	56,65	0 - 6,67	6,67 - 79	79 - 100
CORSE	0,55	22,9	2,63	3,92	0 - 61,67	61,67 - 99,67	99,67 - 100

HER	% de sols de zones humides estimés	Indice topo-climatique seuil	Dénivelée seuil (moyenne)	% ZHP modélisées	Intervalle de l'indice de confiance pour la classe 1 de probabilité	Intervalle de l'indice de confiance pour la classe 2 de probabilité	Intervalle de l'indice de confiance pour la classe 3 de probabilité
DEPRESSIONS SEDIMENTAIRES	37,1	5,5	2,96	46,03	0 - 6,33	6,33 - 75	75 - 100
ALSACE	31,53	6,6	2,84	54,14	0 - 57	57 - 90,67	90,67 - 100
GRANDS CAUSSES	2,72	19,9	14,45	14,73	0 - 52,67	52,67 - 98,33	98,33 - 100
DEPOTS ARGILO SABLEUX	50,4	5,3	2,1	62,96	0 - 7,67	7,67 - 68,67	68,67 - 100
MASSIF CENTRAL NORD	11,77	6,7	3,38	13,40	0 - 6	6 - 59	59 - 100
ARDENNES		5,5	5,98	28,97	0 - 2,67	2,67 - 16	16 - 100
TABLES CALCAIRES - HteNP - AC	12,71	7,3	7,77	21,41	0 - 52,33	52,33 - 91,67	91,67 - 100