# Pré-détermination de zones humides sur le bassin Loire-Bretagne

Pierre-Olivier Mazagol, Rémy Martin, Jérôme Porteret, Céline Thyriot, Bernard Etlicher

▶ **To cite this version:**

Pierre-Olivier Mazagol, Rémy Martin, Jérôme Porteret, Céline Thyriot, Bernard Etlicher. Pré-détermination de zones humides sur le bassin Loire-Bretagne. SIG 2008 : Conférence francophones ESRI, Oct 2008, Versailles, France. hal-00357696

**HAL Id: hal-00357696**
**https://hal.science/hal-00357696**

Submitted on 31 Jan 2009

**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.

# Pré-détermination de zones humides sur le bassin Loire-Bretagne

**Mazagol Pierre-Olivier[*], Martin Rémy[**], Porteret Jérôme[*], Thyriot Céline[**], Etlicher Bernard[*]**

[*] : CRENAM, Université Jean Monnet de Saint-Étienne, CNRS – UMR EVS (contact : pierre.olivier.mazagol@univ-st-etienne.fr)

[**] : Asconit consultants (contact : remy.martin@asconit.com)

Résumé : Cette communication a pour objet de présenter d'une méthodologie de prédétermination des zones humides potentielles en têtes de bassins versants à l'échelle du bassin Loire-Bretagne. Elle se base sur une réflexion sur des facteurs physiques susceptibles de favoriser la mise en place de tels milieux. Ces facteurs sont de quatre ordres : topographiques, géologiques, géomorphologiques, hydrologique. L'ensemble des facteurs sélectionnés sont intégrés à une chaine de traitement SIG. Il en résulte la mise en évidence de 3 types de zones : celles où la présence de zones humides est a priori exclue, celles présentant éventuellement des zones humides et enfin celles présentant une forte probabilité de présence de zones humides. La confrontation de la modélisation avec plusieurs des inventaires pré-existants sur le terrain d'étude fait apparaître des des résultats très satisfaisants avec, en règle générale, 60 à 80% des zones humides existantes classées en zones très favorables, et moins de 10% classées en zones défavorables.

Mots-clés : Zones humides, prédétermination, topographie, géologie, géomorphologie, bassin Loire-Bretagne, SIG

## 1. Introduction

Les zones humides sur le bassin Loire-Bretagne sont un enjeu majeur qui doit être pris en compte dans le cadre de l'actualisation du SDAGE (schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux) pour la période 2010-2015. Lors de la mise en œuvre des SAGE (schémas d'aménagement et de gestion des eaux), les zones humides, notamment en tête de bassin, sont définies comme étant des entités majeures à identifier et à préserver.

L'agence de l'eau Loire-Bretagne[1] est régulièrement sollicitée dans le cadre de ses activités pour financer les études menées lors des inventaires locaux, à l'initiative des collectivités territoriales. Ainsi, la difficulté à identifier les secteurs prioritaires et la demande croissante de financement conduisent l'agence à définir une stratégie de choix en fonction :

- de la probabilité de présence de zones humides
- de la situation ou non en tête de bassin versant.

Notre étude s'inscrit clairement dans cette problématique. Son objectif, fixé par l'agence de l'eau, est la mise en place d'une méthodologie permettant une pré-détermination des zones humides potentielles en tête de bassins versants.

[1] Contact : Jean-François MIGNOT, Agence de l'eau Loire-Bretagne, Avenue Buffon, BP 6339, 45063 ORLEANS cedex 02, FRANCE

Au sein de son territoire, l'établissement public sera ainsi en mesure de définir une probabilité de présence de secteurs à zones humides et notamment en tête de bassin versant. Il pourra alors centrer ses efforts financiers sur les parties à fort enjeu. Des études permettront d'affiner la prédétermination à plus grande échelle et avec des méthodes adaptées (indice Beven-Kirby, télédétection, validation terrain…).

Notre approche a consisté à privilégier une réflexion sur les facteurs physiques susceptibles de favoriser la mise en place des milieux humides.

## 2. Terrain d'étude

Le bassin Loire-Bretagne (Figure 1) s'étend sur 155 000 km², soit 28 % du territoire national métropolitain correspondant au bassin de la Loire et de ses affluents. Il est parcouru par un réseau hydrographique de 135 000 km, aux caractéristiques hydrologiques très contrastées. Il présente environ 2 600 km de côtes et comporte deux massifs anciens à ces extrémités : le Massif armoricain et le Massif central séparés l'un de l'autre par la partie méridionale du bassin parisien de part et d'autre du Val de Loire. Cela lui confère une grande hétérogénéité tant du point de vue géologique que géomorphologique. Il concerne 10 régions, 36 départements, plus de 7 300 communes ce qui en fait un vaste territoire administratif.

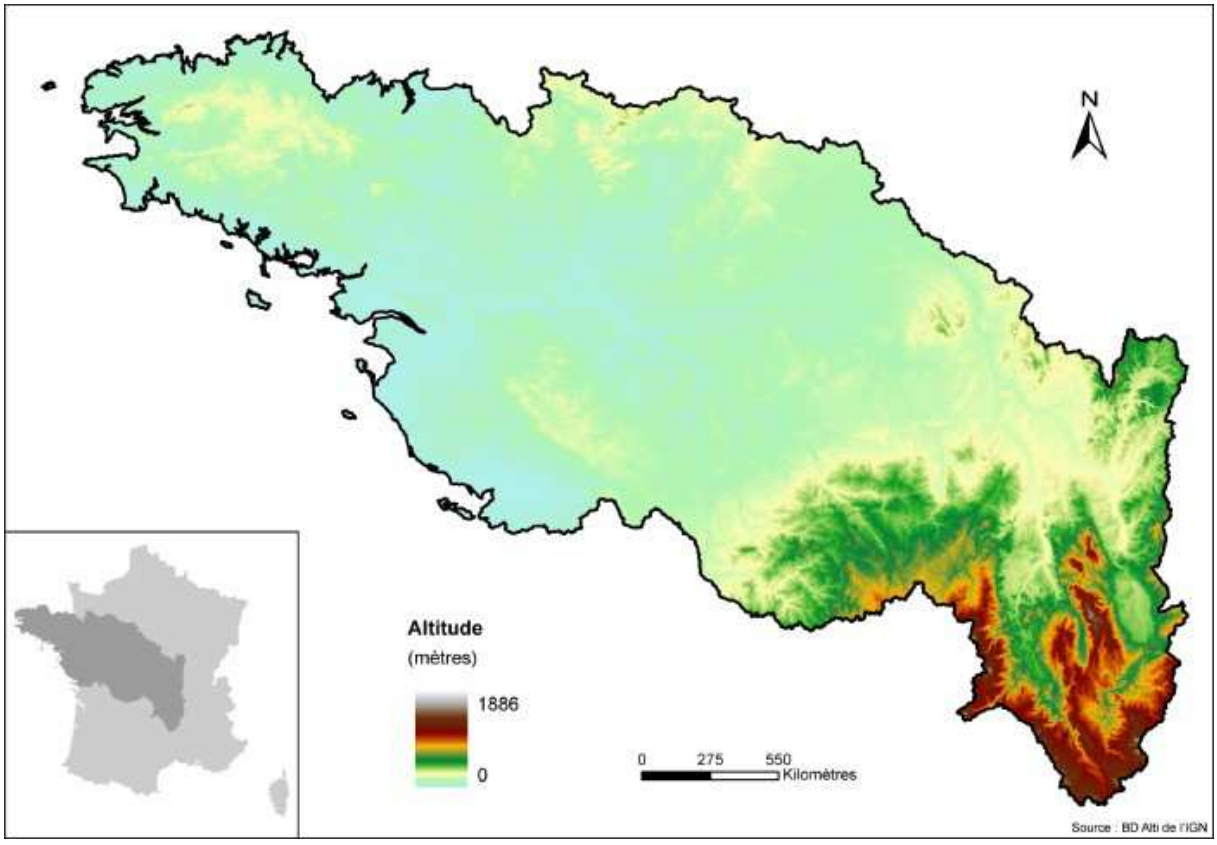


Figure 1 : Localisation et relief du bassin versant Loire-Bretagne

## 3. Données et méthodes

La méthode proposée vise à estimer la probabilité d'apparition de zones humides. Les facteurs climatiques et topographiques, dans la mesure où ils déterminent le bilan de l'eau positif ou neutre indispensable à la mise en place des zones humides, constituent les clefs de l'analyse. Elle repose sur l'idée que le développement de zones humides obéit partout à la combinaison d'un certain nombre de facteurs naturels liés à l'altitude, à la pente, au contexte climatique, à la disposition du lieu par rapport au réseau de drainage et à la nature géologique (formation superficielle et faciès des terrains sous-jacents) ainsi qu'à l'histoire géologique et géomorphologique. L'échelle d'analyse nous a conduit à identifier des paramètres simples, disponibles de manière homogène, sur l'ensemble du territoire.

En proposant une analyse critique des bases de données disponibles qu'il convient d'adapter à l'objectif poursuivi, des modèles de croisement de données adaptés au problème posé, il est possible de construire un modèle qui répartit le territoire entre des secteurs où la probabilité est faible de trouver des zones humides car les facteurs sont globalement défavorables et des secteurs où la probabilité est forte car les facteurs sont favorables, toutes les situations intermédiaires se trouvant également.

La validité d'une telle démarche repose sur trois étapes qui nécessitent débat et qui constituent la limite d'un tel exercice (Etlicher et Bessaney, 1996) :

- la hiérarchisation des données en fonction de l'objectif recherché, ou autrement dit la pertinence des bases de données utilisées pour l'objectif recherché ;
- la construction du modèle de croisement de données qui doit permettre d'identifier les combinaisons de facteurs favorables et défavorables ;
- la hiérarchisation des résultats et la définition de classes de combinaisons (favorables ou défavorables).

Ces différentes étapes sont présentées successivement.

### 3.1. Données

Nous avons disposé de 3 sources de données sur la zone :

- une base de données géologique issue de la combinaison d'une couche de la carte géologique au 1/1 000 000$^{ème}$ du BRGM et d'une couche « unités fonctionnelles / vulnérabilité » fournie par AELB,
- la BD CARTHAGE®,
- le Modèle Numérique de Terrain (MNT) de pas de 50m de la BD ALTI® de l'IGN.

### 3.2. Acquisition des facteurs

Ces facteurs intégrés à la méthodologie sont de quatre ordres :

#### 3.2.1. La topographie

Dans les massifs anciens, la topographie est le premier facteur à l'origine du développement des zones humides. Les hautes surfaces à la topographie tout en relief « mous » sont éminemment favorables au développement d'un drainage incertain. Dès que la pente devient suffisante, l'écoulement s'organise et un réseau de vallons secondaires se met en place. L'altitude est un facteur supplémentaire par le biais des caractères climatiques (élévation des précipitations avec l'altitude, réduction des températures estivales et donc de l'évaporation).

À son tour, l'engorgement des sols peut conduire au développement de végétation hygrophile, voire turfigène, qui est un des moteurs du développement des zones humides en altitude.

Les formes du terrain sont donc essentielles. À l'échelle de travail, avec un MNT au pas de 50 m, on peut espérer identifier les principales formes en creux : cuvettes, vallons plus ou moins dessinés, concavités de bas de versant reliant des plateaux étagés et qui constituent les principaux sites de zones humides. Dans les plaines, c'est au contraire la planéité à basse altitude qui sera le critère essentiel. Certains algorithmes permettent d'estimer, à partir d'un MNT, un certain nombre d'indices morphométriques (courbures du relief, indices topographiques…), qui décrivent les formes du terrain et sont susceptibles d'influer sur les circulations d'eau (Beven et Kirkby, 1979 ; Moore et al., 1991 ; Wood, 1996 ; Florinsky, 2000). Il est cependant nécessaire de porter attention à l'échelle de travail et notamment aux tailles des fenêtres d'analyse permettant l'estimation de ces indices en mode raster (Mazagol, 2006).

Afin d'extraire ces formes du terrain, nous avons utilisé les algorithmes présentés dans la thèse de Jo Wood et implémentés dans l'application Landserf 2.3 ainsi que dans le module « r.param.scale » de Grass 6.2. Cette extraction se fait en trois étapes :

- l'extraction automatique des principaux éléments du relief, principalement les crêtes, les talwegs et les zones planes (mais pas forcément horizontales), secondairement les cols, les sommets et les creux. L'extraction est effectuée sur des fenêtres de 9 pixels par 9. La détermination des zones planes est ici dépendante de valeurs de tolérance (pour la pente (s_tol) et la courbure (c_tol)) déterminées en entrée d'algorithme,
- le calcul des courbures verticales (« profil curvature ») permettant l'obtention d'une estimation de la concavité / convexité des versants (Figure 2). Cette valeur de courbure rend compte, pour les valeurs positives, de l'accélération des flux vers l'aval, les processus gravitationnels étant maximisés, ou de leur décélération pour les valeurs négatives,

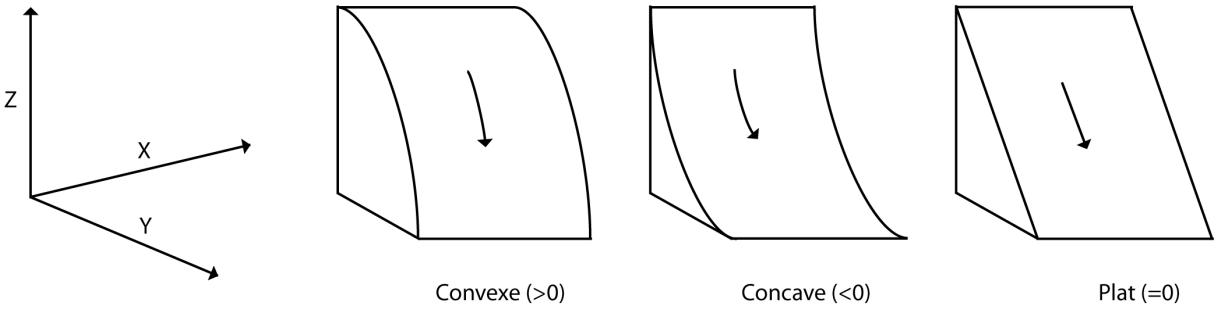


Figure 2 : Trois cas de figure pour la courbure verticale (d'après Florinsky)

- la synthèse des deux couches précédentes en ne conservant que :
  - ✗ les zones de crêtes,
  - ✗ les zones de talwegs,
  - ✗ les zones extraites comme « planes » (avec s_tol=4 et c_tol=0.0003) que nous remplaçons par les valeurs de courbures verticale (reclassées en valeurs négatives (concave) et valeurs positives (convexe)).

Le fichier de synthèse alors obtenus comporte donc 5 classes : crêtes, convexe, plan, concave et talweg (Figure 3)

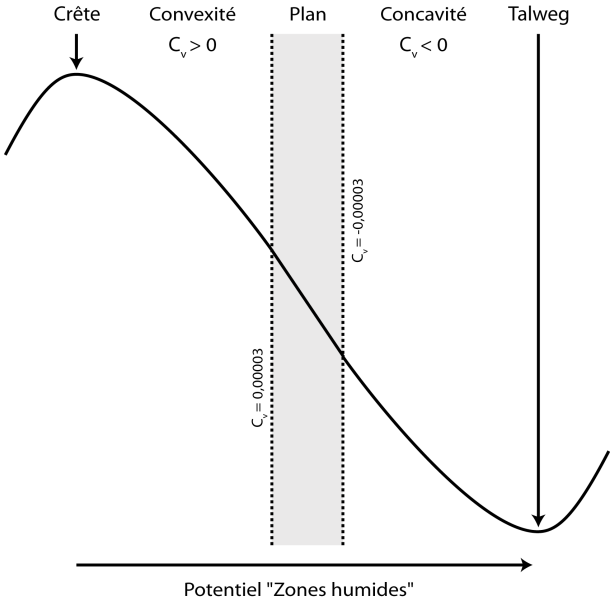


Figure 3 : Classification simple des grandes formes du relief

Cependant, des zones humides alluviales aux zones humides de montagne, il existe une grande diversité des types de zones humides au sein du bassin Loire-Bretagne. Les facteurs qui rendent possible la saturation permanente ou temporaire des sols sont à la fois d'ordre topographique (comme présenté plus haut) mais également d'ordre climatique (bilan hydrique positif ou nul). Nous avons cherché à intégrer ce dernier point. Pour ce faire, nous avons défini trois zones altitudinales qui traduisent les grands types de bilans hydriques représentés dans le bassin Loire-Bretagne, et pour lesquels les formes du terrain sont plus ou moins favorables à l'hydromorphie. Elles ont été délimitées à partir des valeurs d'altitude du MNT suivant deux plans inclinés qui représentent les gradients pluviométriques (ouest – est) et thermiques (nord – sud) de la zone (Figure 4) :

- Zone 1 : les zones humides naturelles ne peuvent se développer qu'à la faveur de zones en creux où s'accumulent les flux (talweg et concavité à faible pente et zones planes) et en bordure de cours d'eau.
- Zone 2 : secteur où, l'altitude augmentant, les conditions climatiques sont plus humides. Compte tenu des écoulements de surface et des nappes, les zones humides peuvent être présentes sur des pentes faibles à modérées en bas de versant (plan + concave) et dans les talwegs.
- Zone 3 : les conditions climatiques humides permettent un bilan hydrique excédentaire. Les zones humides sont présentes sur tous les types de forme de terrain lorsque la pente le permet.

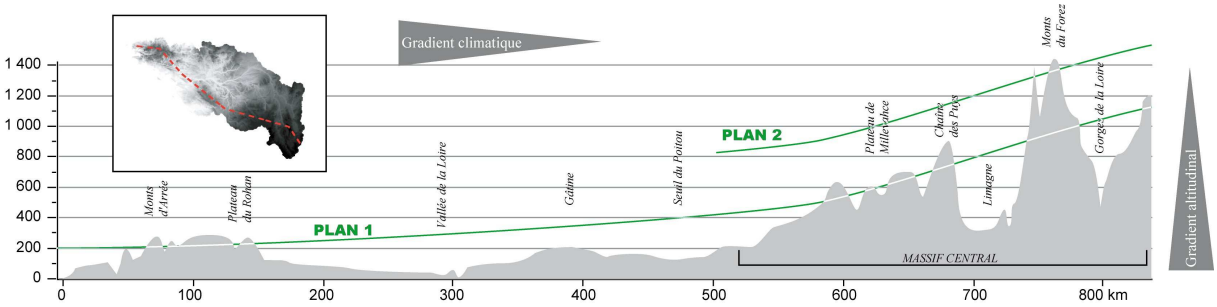


Figure 4 : Zones altitudinales traduisant les différents contextes hydro-climatiques

La limite entre la zone 1 et 2 (PLAN 1) correspond à un plan incliné qui représente la limite inférieure de la turfigénèse (200 à 250 m en Bretagne, 500 à 550 m dans le Limousin et 900 à 1000 m dans le Forez). La limite entre la zone 2 et 3 (PLAN 2) correspond à un plan incliné qui traduit l'ombrotrophie, c'est-à-dire la présence de zones humides uniquement tributaires des précipitations, s'affranchissant de la topographie. Cela ne concerne que le Massif Central pour les parties supérieures à 1400 m d'altitude (altitude de PLAN 1 + 500 m). Enfin, le critère de pente permet de classer les formes du terrain favorables ou non à la présence de zones humides. En effet, la potentialité de présence de zones humides est très différente entre un talweg de vallée, dont la pente n'excède pas quelques degrés, et celle d'un talweg de torrent montagnard, dont la pente peut être très importante. Toutefois, il n'existe pas dans la littérature scientifique de seuils clairement établis pour discriminer les phénomènes d'accumulation ou de ralentissement de l'eau le long des versants. En effet, les phénomènes de circulation de l'eau dans le long des versants sont complexes et mettent en jeu non seulement les pentes, mais également les formations superficielles et la végétation de surface. Nous avons donc choisi des seuils de pentes « réalistes » qui puissent s'appliquer à l'échelle du bassin Loire-Bretagne. S'ils sont forcément simplistes, ils permettent, dans le cadre de l'analyse, de traduire la très faible potentialité des secteurs à fortes pentes dans les zones montagnardes.

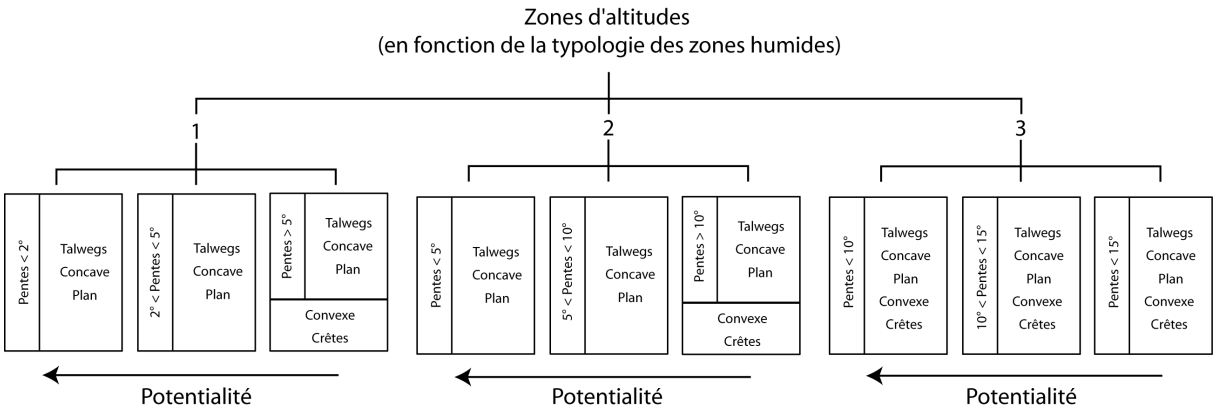


Figure 5 : Classification des formes du terrain

Le fichier obtenu à l'issu de l'application de cette classification comporte donc 3 classes.

### 3.2.2. La géologie

L'utilisation de la carte géologique au 1/ 1 000 000ème présente plusieurs intérêts. Document relativement récent et homogénéisé par rapport aux diverses couvertures au 1/50 000ème, il est plus facile à interpréter. L'imprécision de l'échelle est compensée par une meilleure homogénéisation des taxons. Les levers où les formations superficielles ne sont qu'imparfaitement prises en considération ont cependant été autant de difficultés à surmonter.

Dans le socle, l'analyse devra sélectionner les ensembles géologiques, aptes avec une approche distincte suivant les grands ensembles structuraux.

Concernant les roches éruptives et métamorphiques qui sont globalement considérées comme imperméables, la capacité de développement des zones humides dépend avant tout de la présence d'altérites superficielles suffisamment épaisses, jouant le rôle de compresse humide au-dessus de la roche saine.

Dans la mesure où la cartographie de ces couvertures n'est pas disponible, il faut utiliser des moyens indirects pour les identifier. Dans le Massif central, la quasi-totalité de ces couvertures résulte de l'altération in situ de la roche. Tout au plus, des remobilisations locales sur les versants lorsque les pentes sont suffisantes ont été mises en évidence ; ce sont les arènes en place, les arènes affectées par la gélifluxion, les « couverts d'arènes remaniées » (Valadas, 1984 ; Etlicher, 1986). De ce fait, la présence de ces couvertures peut être déduite de la topographie et de la sensibilité de la roche à l'arénisation. Il est possible d'estimer l'extension de ces couvertures en identifiant les faciès les plus sensibles à l'arénisation.

Pour une large part, cette résistance dépend des paramètres suivants : la composition minéralogique et chimique, la présence en quantité notable d'un certain nombre de minéraux constituant un facteur de fragilité. La biotite et les plagioclases sont connus (Godard et al., 1994), comme étant facteurs de faiblesse, l'orthose et la muscovite comme facteur de résistance. Les schistes et micaschistes, lorsqu'ils sont altérés sont favorables, les produits d'altération ayant en général, une forte teneur argileuse. L'incertitude sur le rôle des paramètres texturaux des faciès, taille du grain, arrangement, a conduit à ne pas utiliser ces paramètres. Il est également difficile d'utiliser des paramètres liés à la fracturation et à la diaclasation moyenne. Bien que ce facteur soit important, on ne dispose d'aucune étude homogène sur le réseau de fracturation du socle. Si certains secteurs ont fait l'objet d'analyses sur les champs de contraintes (Forez, Limousin), ils n'ont qu'exceptionnellement donné lieu à une cartographie détaillée utilisable dans notre contexte.

À partir de ces contours, une hiérarchie des faciès a été élaborée en fonction de la composition chimique et minéralogique des roches du socle. En complément des données de la carte, l'identification est précisée par les données de la littérature par grandes unités structurales (type granite du Velay). L'échelle de résistance prend en compte la composition chimique et minéralogique moyenne, teneur en plagioclases et biotite comme facteur de fragilité, en orthoses notamment comme facteur de résistance.

Dans les terrains sédimentaires, l'identification des faciès favorables est plus aisée. Toutefois, la nature du faciès qui joue un rôle déterminant par le facteur perméabilité/imperméabilité (calcaire ou argile par exemple) n'est pas toujours présente dans la base de données où le champ identifiant la formation est l'âge. Des requêtes dans la base ont permis avec plus ou moins de précision d'identifier ces faciès.

Chaque polygone s'est donc vu attribué un code en fonction de son comportement face à l'écoulement des eaux. On a distingué, les roches sédimentaires et volcaniques d'une part, et le socle cristallin d'autre part.

Les faciès ont été regroupés en 6 classes distinctes :

- le code 1 regroupe les ensembles perméables : sables, calcaires massifs, laves massives,
- le code 2 regroupe les faciès moyennement perméables : Calcaires marneux, grès..,
- le code 3 regroupe les couches plutôt imperméables : marnes et marno-calcaires, grès schistes et shales quartzites, sédimentaires primaires, souvent peu ou pas différenciés,
- le code 4 regroupe les roches très imperméables, argiles, nappes d'altération argileuses type argile à silex alluvions de crues des rivières, remplissages flandriens…,
- les codes 5 et 6 regroupent les roches plutoniques, cristallines et métamorphiques. Le code 5 est réservé aux roches altérables, susceptibles de porter une couverture d'arènes autochtones continue, pouvant faire office de compresse humide en surface et les codes 6 aux roches peu arénisables, où la couverture est mince et discontinue. Ici aussi, l'utilisation de la couche unité fonctionnelle a été précieuse car les taxons sont classés en fonction de l'âge de la granitisation.

Nous relèverons cependant un certain nombre de limites à ce reclassement :

- l'imprécision sur le faciès, cette information n'étant pas disponibles pour certains taxons. Nous nous sommes aidés de la carte au 1/50 000ème lorsque c'était possible.
- le recouvrement formation superficielle/roche en place qui peut être de comportement très différent. On a privilégié la formation superficielle, mais celle-ci peut être discontinue et reposer sur plusieurs faciès différents.
- l'hétérogénéité des regroupements du BRGM : le jurassique n'est divisé qu'en trois unités alors que la distinction des faciès imposerait, comme sur la carte à la 1/50 000ème, une division plus détaillée. On a retenu le faciès qui paraît dominant, par exemple le calcaire marneux pour J1 qui correspond au lias et qui comporte des bancs de calcaire franc entre les couches marneuses. D'autre part, si les trois distinctions sont présentes sur certains secteurs du bassin, dans d'autres, la carte mentionne un unique taxon J indifférencié sans préciser, à quelles subdivisions il correspond dans les autres parties du bassin. Ce problème est majeur et se retrouve pour presque tous les étages, différenciés dans une région et pas dans l'autre,
- les taxons mal définis recouvrant des dépôts d'origines très diverses comme les dépôts quaternaires où le q3 regroupe tant des cordons dunaires que des moraines glaciaires sans possibilité de les extraire automatiquement commodément.
- enfin les erreurs de report ou d'interprétation des dépôts, comme la présence dépôts glaciaires sur les Monts de la Madeleine qui n'ont jamais connu d'épisodes glaciaires, et ne présentent pas de l'aveu même de l'auteur du 1/50 000e de dépôt de cette nature, ou la présence insolite de egm (sédiments Tertiaires) dans les Bois Noirs… pour ne citer que deux exemples.

### 3.3.3. La géomorphologie

L'histoire géomorphologique est également une donnée essentielle qui conditionne le développement des couvertures d'altérites sur le socle. Toutes les études ont mis en évidence le caractère ancien de ces couvertures d'altérites qui remontent pour l'essentiel au Tertiaire. Il

est donc clair que les secteurs exhumés récemment d'une couverture sédimentaire, ce qui est souvent le cas sur les bordures des socles, notamment au nord, (contact Marche-Boischaut par exemple) ou qui ont connu un déblaiement de ces altérites par les actions périglaciaires ou glaciaires quaternaires échappent aujourd'hui au domaine des régions à couverture suffisante et continue. Seuls les fonds de vallons peuvent être empâtés lorsque le drainage est insuffisant. La synthèse de l'évolution géomorphologique tertiaire est bien connue depuis les travaux de Le Griel (Le Griel, 1991) et de Klein (Klein, 1975, 1990, 1997), sur l'ensemble du Massif Central, et de nombreux auteurs cités en référence dans ces synthèses (Figure 6 et Figure 7).

Toutes mettent en évidence l'existence de trois étapes fondamentales :

- Premièrement, une phase d'altération principale d'âge Secondaire/début du Tertiaire qui conduit à la mise en place de la surface fondamentale dite « éogène » par Baulig (Baulig, 1928), Meso Tertiaire ou S2 par Claude Klein (Klein, 1986, 1990, 1997), et constitue en de nombreux endroits, la surface fondamentale des hauts plateaux du Massif Central. C'est elle qui est responsable de l'allure tabulaire des hautes surfaces qui se sont conservées jusqu'à nos jours. Sans entrer dans le détail complexe et discuté de cette élaboration, la cartographie de cette surface est un héritage géomorphologique essentiel pour comprendre la répartition des plateaux aux surfaces molles et au drainage incertain. Seuls des reliefs très limités en étendue, dominent cette surface générale. Souvent associés à des facteurs locaux de résistance ou structuraux du socle, ils ne masquent pas la planéité générale.(Granodiorites de Pierre-sur-Haute en Forez au-dessus du granite du Velay, Massifs leucogranitiques de Saint Goussaud en Limousin etc...) ;
- Ensuite, une phase de soulèvement tectonique au milieu du Tertiaire, Miocène surtout et parfois Pliocène, qui affecte et déforme la surface précédente : ce soulèvement prend tantôt la forme de bombement à grand rayon de courbure, tantôt prend un style cassant avec horsts et grabens. Ce dernier de cas de figure est plus répandu à l'Est, où le soulèvement a été plus énergique mais il existe ailleurs. Il est à l'origine d'une reprise d'érosion générale et du développement de niveaux inférieurs d'aplanissements localisés organisés autour du réseau hydrographique qui se met en place à cette période.

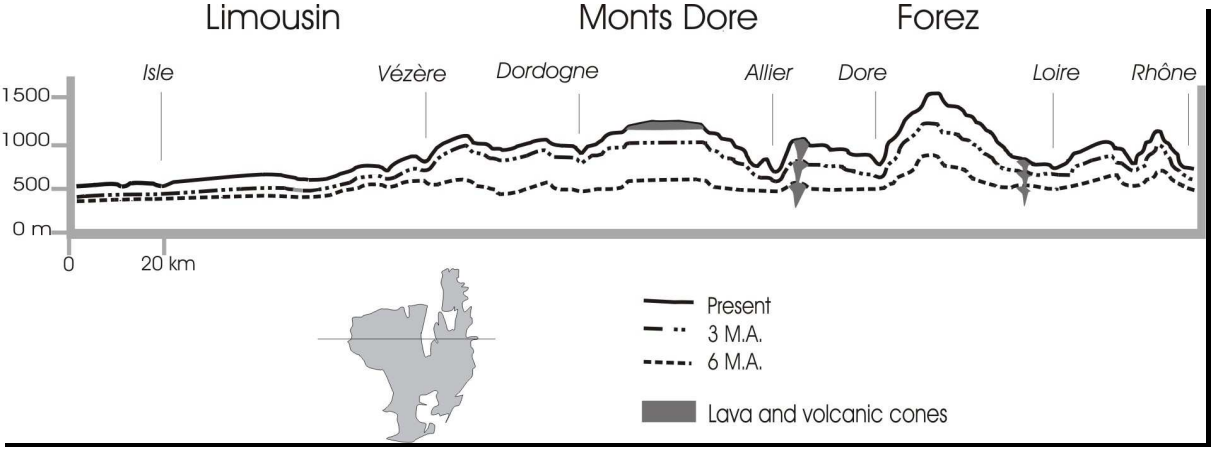


Figure 6 : L'importance relative du soulèvement Mio-Pliocène dans le Massif Central *from (Le Griel, 1991), in Etlicher, Physical geography of north western Europe (Etlicher, 2004)*

Ces niveaux d'aplanissements localisés, positionnés en bordure des bassins sédimentaires sous forme de pédiments, élaborés probablement au Tortonien, sont dominés par les plateaux précédents et constituent l'amorce d'un cycle inférieur qui se prolonge en leur sein par un systèmes de larges vallées et alvéoles où les phénomènes d'érosion différentielle sont essentiels. Ces systèmes pédimentaires et leurs prolongements amont, se caractérisent par leur âge, par leur organisation, en relation avec le réseau hydrographique actuel, ce qui n'est nullement le cas des aplanissements sommitaux d'âge Éogène. Partout, la couverture d'altérites y est assez faible et discontinue, et ils sont peu propices au développement de zones humides, excepté dans les vallons à faible pente qui ne font pas l'objet d'un drainage énergique ;

- Enfin, une phase d'incision vigoureuse liée à une deuxième phase de surrection fini-Tertiaire provoquant l'encaissement du réseau hydrographique dans la partie basse des vallées en bordure du massif, avec une évolution régressive vers l'amont plus ou moins étendue. Nulle part, cette phase n'a pu pénétrer assez loin à l'amont pour défoncer la surface sommitale. En revanche, les pédiments miocènes ont parfois été totalement défoncés par des réseaux de gorges (Valcivières en livradois) parfois au contraire été remarquablement conservés (Chalmazel en Forez) suivant les caractères du dispositif local. Cette évolution explique que ces ensembles morphologiques soient défavorables à la conservation de vastes couvertures d'altérites continues et donc de secteurs humides.

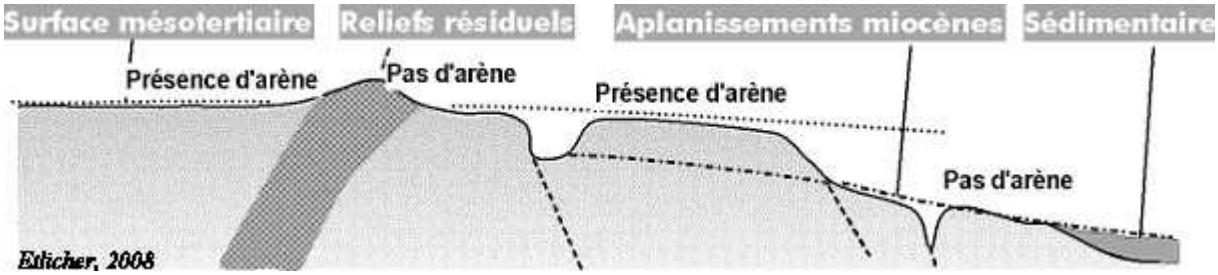


Figure 7 : Schéma interprétatif des principales unités topographiques du socle (Synthèse d'après de nombreux auteurs)

Dans le massif armoricain, l'histoire bien connue également (Klein, 1975) laisse une part plus modeste au rajeunissement récent : la surface fondamentale est très ancienne, et de ce fait, il n'est pas possible de distinguer des générations de couverts d'altérites liées à des surfaces différentes. Seule la lithologie et la présence des limons interviennent.

A partir du MNT, nous avons, à partir de critères topographiques, isolé les surfaces planes favorables en ne retenant que la surface « MésoTertiaire » et en excluant les pédiments miocènes et lambeaux de surfaces exhumés à basse altitude, ainsi que toutes les gorges des secteurs périphériques du massif.

Compte tenu du gauchissement et de la déformation du massif, de son morcellement en horsts et graben, une limite altitudinale unique ne peut être retenue pour caractériser l'altitude des différentes surfaces d'aplanissement. La méthode a consisté à traiter indépendamment les différentes régions, (Limousin, Margeride, Velay…) et à rechercher soit la construction d'un plan théorique à partir de points où l'altitude de la surface est connue et datée d'après les données de la littérature, soit par une analyse statistique des altitudes du MNT qui fait apparaître la plus grande fréquence des altitudes correspondants aux surfaces des plateaux.

Cette méthode dite des « surfaces enveloppe » a fait l'objet de plusieurs applications dans le secteur concerné dans le Limousin (Freytet et Morel, 1987 ; Freytet, 1988 ; Lerouge et Freytet, 1988) ou dans le Velay (Chafchafi, 1994).

### 3.3.4. La densité de drainage

Ce facteur peut traduire deux réalités différentes. En effet, en région sédimentaire, l'absence de drainage peut traduire la présence d'une zone perméable induisant l'absence de zones humides. Par contre, en région de socle, elle peut indiquer une incapacité du réseau hydrographique à s'organiser où la présence d'un substrat « en éponge » indiquant la possibilité de mise en place de zones humides. On note donc que ce facteur est donc considéré inversement en fonction de si l'on se trouve en région de socle ou en région sédimentaire.

Cette densité de drainage a été estimée à partir de la BD Carthage en utilisant l'algorithme « Densité de lignes » d'ArcGis 9.2.

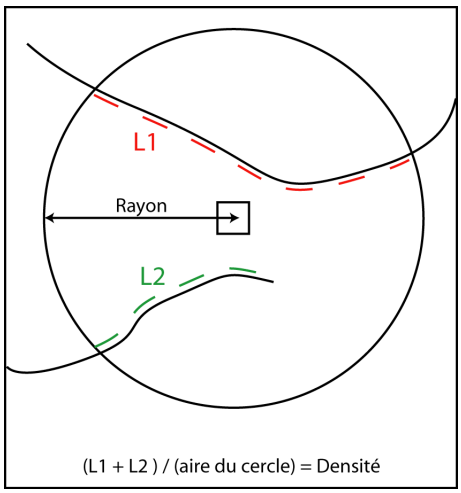


Figure 8 : Principe de fonctionnement de l'algorithme "densité de lignes"

Ce dernier calcul la longueur totale d'éléments linéaires (dans notre cas les cours d'eau) par unité de surface (notre choix étant le km²) au sein d'un cercle d'un rayon défini (dans notre cas 100m). La valeur est obtenue est alors attribuée au pixel central du cercle (Figure 8).

Les valeurs ainsi obtenues sont ensuite reclassées en 4 classes par la méthode des seuils de Jenk.

## 3.4. Croisement des données

Les quatre facteurs sélectionnés sont ensuite combinés. L'opération s'effectue en deux phases parallèles (Figure 9).

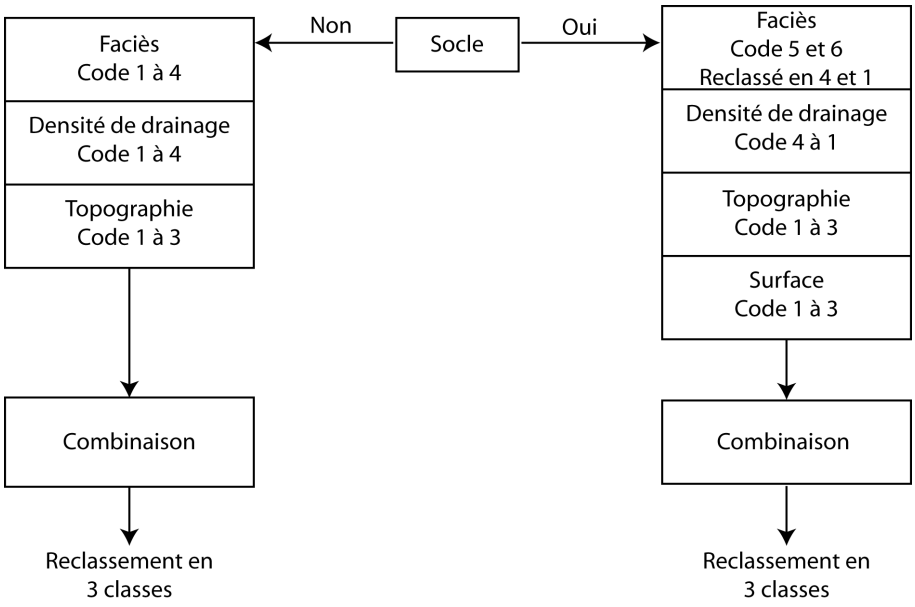


Figure 9 : Organigramme de combinaison des différents facteurs

En effet, la démarche n'est pas la même si l'on se trouve en région de socle ou non, et ce pour trois raisons :

- l'existence de deux classes de la couche « Faciès » qui sont spécifiques aux régions de socle (classes 5 et 6),
- la prise en compte de la densité de drainage inverse dans ce cas,
- l'intégration du facteur « Surface d'érosion ».

La combinaison des données est effectuée par le biais de la calculatrice raster. Il s'agit de faire la somme des valeurs en appliquant pour chaque couche le coefficient proposé selon la table ci-dessus (Tableau 1).

| | | Non socle | | | | Socle | | | | Coefficients |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Faciès | Classe | *1* | *2* | *3* | *4* | *5* | *6* | | | **2** |
| | Reclassement | **1** | **4** | **8** | **12** | **12** | **1** | | | |
| Topographie | Classe | *1* | *2* | *3* | | *1* | *2* | *3* | | **4** |
| | Reclassement | **1** | **6** | **12** | | **1** | **6** | **12** | | |
| Drainage | Classe | *1* | *2* | *3* | *4* | *1* | *2* | *3* | *4* | **1** |
| | Reclassement | **1** | **4** | **8** | **12** | **12** | **8** | **4** | **1** | |
| Surface | Classe | | | | | *1* | *2* | *3* | | **4** |
| | Reclassement | | | | | **1** | **6** | **12** | | |

Tableau 1 : Table de reclassement et d'application de pondérations

Ainsi les résultats obtenus sont compris entre 7 et 84 pour les régions sédimentaires et entre 11 à 132 pour les régions de socle. Ils sont alors reclassés en 3 classes d'amplitude équivalente où les faibles valeurs constituent une potentialité très faible à nulle et les fortes valeurs une potentialité importante.

### 3.4. Isolement des têtes de bassin versant

Si une cartographie à l'échelle du bassin versant est obtenue, la demande de l'agence de l'eau portait uniquement sur les têtes de bassin versant. Il a donc été nécessaire de les extraire. Le SDAGE définit les têtes de bassin comme étant le bassin versant des cours d'eau dont le rang de Stralher est inférieur où égal à 2 (utilisation de la BD CARTHAGE) et dont la pente est supérieure à 1%, sur tout ou partie de leur tracé (utilisation du MNT). Tous les cours d'eau de rang inférieur où égal à 2 ne sont toutefois pas pris en considération. Afin de ne garder que les « grandes têtes de bassin », seuls les cours d'eau de rang inférieur où égal à 2 se jetant dans un cours d'eau de rang N+1 sont conservés. D'autres cours d'eau sont également exclus de la définition :

- les cours d'eau de rang 3 ou plus,
- les canaux (pour ne pas dénaturer les bassins versants topographiques),
- les affluents de rang 1 ayant un tributaire de rang 3 ou plus,
- les affluents de rang 2 ayant un tributaire de rang 4 ou plus.

Les manipulations ont été réalisées sous ArcGIS 9.2. Elles comprennent différentes étapes, toutes réalisé sous ArcGis 9.2 avec Spatial analyst.

Les cours d'eau ont donc été sélectionnés et transformés en entités géométriques par fusion du champ CGENELIN. Une nouvelle sélection a alors été effectuée concernant :

- les cours d'eau de rang 1 connectés à des cours d'eau de rang 2 d'une part,
- les cours d'eau de rang 2 connectés à des cours d'eau de rang 3 d'autre part.

Leur longueur a alors été calculée et nous avons extrait les points amont et aval de chacun (par utilisation d'un script VBA avec la calculatrice) ainsi que leurs altitudes (à partir du MNT). Le dénivelé de chaque cours d'eau a alors été obtenu par le calcul de la valeur absolue de la différence entre ces deux valeurs. Longueurs et dénivelés nous ont alors permis de calculer les pentes de chacun des cours d'eau sélectionnés et de ne conserver que ceux pour lesquelles elle était supérieure à 1%.

Les cours d'eau issus de la sélection ont été rasterisés pour calculer les bassins versants. Afin d'obtenir un zonage vaste des bassins et non pas un bassin par cours d'eau, un regroupement « régional » des cours d'eau a été réalisé.

Les têtes de bassins versant ont quant à elles été isolées (dans spatial analyst) à partir du MNT (après comblement des cuvettes) par calcul des directions d'écoulement, puis par extraction des bassins versants (en intégrant la « régionalisation des cours d'eau » et les directions d'écoulement). Elles ont enfin été vectorisées.

Nos tests ont montré que la délimitation des bassins versants est améliorée par l'intégration de l'ensemble du réseau hydrographique (petit chevelu compris), plutôt que simplement les exutoires des bassins comme suggéré dans la fonction de spatial analyst. Cela permet de pallier les incohérences existant entre la position de l'exutoire depuis lequel on souhaite déterminer le bassin versant et celles des talwegs sur le MNT. En effet, la zone de drainage matérialisée par un linéaire est plus précise que la représentation ponctuelle de l'exutoire. Sur l'ensemble du tracé il est ainsi possible de « rattraper » certains décalages entre les données.

## 4. Résultats

Nous avons donc obtenu une carte qui présente trois classes traduisant une potentialité plus ou moins importante au développement de zones humides. On note un équilibre relatif quant à la

distribution, en terme de surface, des trois classes (Tableau 2), avec une valeur plus faible pour la classe 2, relevant de zones plutôt favorables. Par contre, les classes 1 et 3 présentent des étendues très comparables, traduisant que nos manipulations conduisent à identifier autant de zones défavorables que de zones très favorables. Enfin, si l'on se focalise uniquement sur les têtes de bassin versants, on note une augmentation des zones défavorables principalement au détriment des zones très favorables.

| Pré-détermination | Superficies par rapport au bassin vers Loire-Bretagne | Superficies par rapport aux têtes de bassin |
|---|---|---|
| 1 | 35,6% | 42,2% |
| 2 | 27,9% | 31,8% |
| 3 | 36,5% | 26,0% |

Tableau 2 : Superficies occupées par les 3 classes de notre cartographie de pré-détermination

Il va de soi qu'une validation s'est avérée nécessaire. Pour cela, nous disposions de 2 jeux de données : un inventaire des zones humides du Finistère (fourni par l'agence de l'eau Loire-Bretagne) ainsi qu'un inventaire des tourbières des monts du Forez (Porteret, 2008). Enfin, l'inventaire des tourbières réalisé par le CREN (Conservatoire Rhône-Alpes des Espaces Naturels). Nous avons alors soumis notre cartographie à deux types de validation.

Tout d'abord, nous avons mené une validation visuelle, en focalisant sur un certaine nombre de zones afin d'estimer la concordance entre notre modélisation et la réalité terrain (Figure 10). La correspondance est très satisfaisante, montrant une excellente adéquation entre nos prédictions et la réalité terrain.

Mais une telle validation ne se suffit pas en elle-même. Nous avons donc également effectué une validation statistique, en évaluant quelle part de ces différentes zones humides « avérées » est classée en zones 1, 2 ou 3.

| Pré-détermination | Ensemble du bassin versant Loire-Bretagne | Uniquement dans les têtes de bassins |
|---|---|---|
| 1 | 9,8% | 9,3% |
| 2 | 34,5% | 27,4% |
| 3 | 55,6% | 63,3% |

Tableau 3 : Répartition de zones humides inventoriées dans les différentes classes de notre prédétermination

Tout d'abord, nous avons considéré en un bloc tous les inventaires dont nous avons disposé, et ce, quel que soit l'indice de confiance associé aux zones humides qui y figuraient (Tableau 3). On note un taux d'« erreurs » inférieur à 10%, correspondant à des zones humides localisées en zone défavorable suivant notre modélisation. Notre taux de succès s'élève donc à plus de 55%, et même à plus de 90% si l'on considère également les tourbières zones humides classées en zone 2. La même analyse uniquement au niveau des têtes de bassins montre une amélioration des résultats, essentiellement pour les zones de classes 3 au détriment de celles en classe 2.

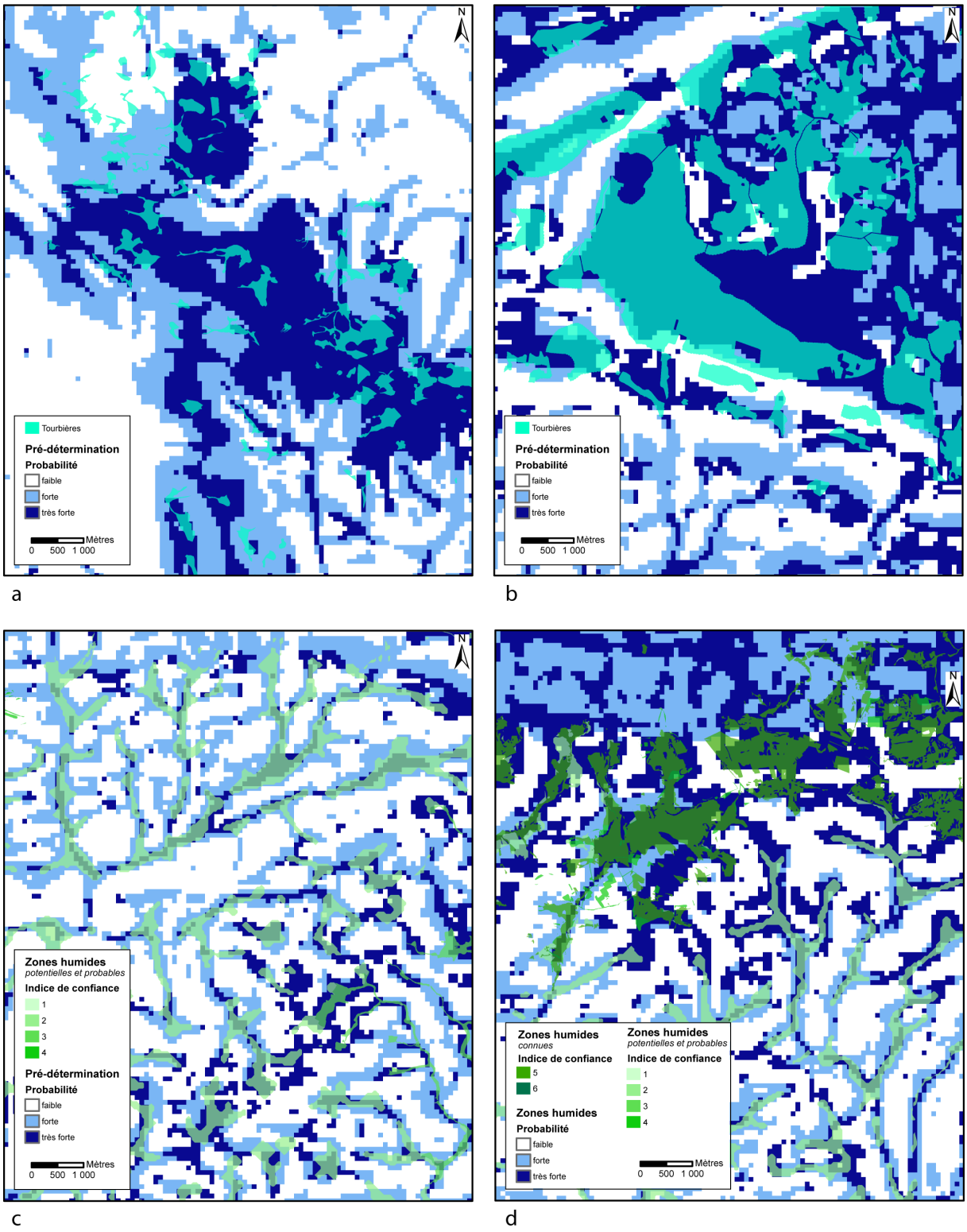


Figure 10 : comparaison entre la cartographie de prédétermination et différents inventaires pré-existants (a : Hautes Chaumes des Monts du Forez (Massif central) ; b, c et d : Inventaire des zones humides du Finistère)

Si l'on s'intéresse plus précisément aux seules tourbières (Tableau 4), le succès avoisine dans tous les cas les 70%, s'élevant jusqu'à environ 90% en considérant comme succès les tourbières classées en 2. Ce sont les tourbières « Hautes Chaumes » qui donnent les meilleurs résultats et les tourbières « CREN » les moins bons. Cela est facilement explicable par la qualité des données. En effet, les tourbières des « Hautes Chaumes » font l'objet d'un suivi ancien et précis, alors que les limites des tourbières du CREN sont beaucoup plus grossières. Une focalisation sur les têtes de bassin versant nous montre une nette amélioration de notre prédiction, pouvant aller jusqu'à plus de 7% d'augmentation.

| | Ensemble du bassin versant Loire-Bretagne | | | | Uniquement dans les têtes de bassins | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Pré-détermination | Hautes Chaumes | Finistère | CREN | Total | Hautes Chaumes | Finistère | CREN | Total |
| 1 | 9,1% | 12,7% | 16,7% | 12,7% | 4,8% | 11,1% | 13,6% | 13% |
| 2 | 20,5% | 17,2% | 16,9% | 17,5% | 17,1% | 11,7% | 17,2% | 17% |
| 3 | 70,4% | 70,1% | 66,4% | 69,8% | 78,1% | 77,2% | 69,2% | 71% |

Tableau 4 : validation de notre cartographie à partir des les inventaires de tourbières préexistants mis à notre disposition

Au sein de l'inventaire du Finistère, les zones humides possèdent un indice de confiance quant à leur existence. On peut observer que cet indice reste en adéquation avec nos propres résultats. En effet, on note que pour l'indice de confiance 1 (Tableau 5), la majorité des zones humides (59,6%) sont localisées dans notre carte au sein de zones de classe 2, c'est-à-dire présentant une certaine incertitude. Les résultats sont inverses pour les indices 2 et 3. Par contre, on remarque des résultats beaucoup plus mitigés pour les zones humides à indice de confiance 4. On atteint en effet un taux d'« erreurs » de 28,6%, supérieur à pratiquement 20% du taux d'« erreur » général. Notons cependant que ces zones humides ne représentent que 6,8% de l'ensemble, cela pouvant expliquer ce résultat décevant.

Si l'on ne s'intéresse qu'aux têtes de bassin, on note de nouveau une nette amélioration des résultats, sauf pour les zones humides à indice de confiance 4, pour lesquelles les résultats s'éloigne encore plus de la tendance générale.

| Pré-détermination | Zones humides potentielles du Finistère (Indice de confiance) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Ensemble du bassin versant Loire-Bretagne | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | Total |
| 1 | 8,5% | 9,5% | 6,7% | 28,6% | 9,8% |
| 2 | 59,6% | 37,5% | 38,1% | 29,4% | 37,2% |
| 3 | 31,9% | 53,0% | 55,2% | 42,0% | 53,0% |
| *Représentativité* | *0,1%* | *58,2%* | *34,9%* | *6,8%* | *100,0%* |
| Pré-détermination | Uniquement dans les têtes de bassin | | | | |
| 1 | 0,0% | 7,1% | 4,6% | 30,5% | 8,0% |
| 2 | 87,5% | 33,2% | 30,6% | 20,4% | 31,3% |
| 3 | 12,5% | 59,7% | 64,7% | 49,2% | 60,7% |
| *Représentativité* | *0,0%* | *55,0%* | *37,1%* | *7,9%* | *100,0%* |

Tableau 5 : validation de notre cartographie à partir des les inventaires de zones humides potentielles et probables du Finistère

Pour des indices de confiance supérieurs, les résultats sont là encore améliorés (Tableau 6).

| Pré-détermination | Zones humides potentielles du Finistère (Indice de confiance) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ensemble du bassin versant Loire-Bretagne | | | Uniquement dans les têtes de bassins | | |
| | 5 | 6 | Total | 5 | 6 | Total |
| 1 | 6,5% | 6,4% | 6,5% | 7,6% | 4,9% | 7,4% |
| 2 | 24,2% | 38,5% | 27,7% | 18,7% | 30,2% | 19,7% |
| 3 | 69,3% | 55,0% | 65,8% | 73,7% | 64,9% | 73,0% |
| *Représentativité* | *75,6%* | *24,4%* | *100,0%* | *91,5%* | *8,5%* | *100,0%* |

Tableau 6 : validation de notre cartographie à partir des les inventaires de zones humides connues du Finistère

## 5. Discussion

Rappelons d'abord que l'objectif de l'étude était de réaliser une pré-détermination des zones humides potentielles. Il ne s'agit donc pas d'une cartographie précise et exhaustive de ces zones humides. Les résultats sont uniquement le fruit d'une modélisation qui ne peut en rien remplacer un inventaire couplant à la fois photointerprétation, télédétection et campagnes de validation terrain. Mais elle peut cependant donner des indications importantes et orienter la démarche.

Une des premières difficultés auxquelles on se trouve confronté lorsque l'on entreprend une telle étude est la disponibilité de données, de manière homogène, sur l'ensemble du terrain d'étude. Cette difficulté est d'ailleurs d'autant plus grande que le territoire est vaste. Il y a donc certaines limites à vouloir modéliser des phénomènes tels que celui présenté ci-dessus, surtout lorsque le temps imparti pour l'étude est court. Il est alors souvent impossible d'intégrer tous les facteurs susceptibles d'intervenir dans la mise en place et le maintien des structures étudiées, ici, les zones humides.

Un deuxième obstacle est la grande diversité de types de zone humides, qui possèdent chacun leurs propres caractéristiques et représentent autant de contraintes qui doivent être intégrées à une démarche telle que la nôtre. L'hétérogénéité (tant géologique que géomorphologique), du secteur analysé explique pour une part la diversité des types de zones humides présentes. Il faut donc faire un arbitrage entre une complexification des modèles au risque de les rendre incompréhensible et d'allonger leur mise en œuvre et une simplification qui aboutit à faire chuter le taux de succès sur les zones témoins. Encore faut il ajouter que nous ne disposons de zones témoin également réparties sur le territoire, et en particulier dans le Bassin Parisien. La validation dans des inventaires pré-existants, doit être complétée, prenant en compte un plus grande nombre de bases de données, sur d'autres régions, notamment en milieu sédimentaire.

L'intégration de facteurs anthropiques dans la modélisation a été envisagée mais est restée soumise aux mêmes remarques, à savoir la disponibilité de données suffisamment homogènes et surtout pertinentes à l'échelle du bassin. Il en va de même pour d'autres facteurs physiques tels que par exemple la pédologie.

La méthodologie est liée à une démarche purement géomatique, mais elle nécessite cependant une expertise géologique et géomorphologique. Par exemple, dans le cas de notre étude, la classification des faciès géologiques a été rendue difficile par les données disponibles et par l'étendue du terrain d'étude.

## 6. Conclusion

Notre démarche est donc couronnée d'un certain succès, tout en restant facilement déployable, mobilisant, telle qu'elle est présentée ci-dessus peut de donner. Elle se place comme étape préalable à des inventaires poussés de zones humides en fournissant des indications importantes permettant d'orienter la démarche.

Elle demeure encore en voie de maturation et d'amélioration au travers différents travaux réalisés au sein de Crenam, notamment d'une étude sur les zones humides des Monts du Forez (Massif central) et du pré-inventaire des zones humides du département du Cantal où elle est intégrée à la phase 1 de l'étude.

## Biobliographie

Baulig H., 1928, *Le Plateau Central de la France et sa bordure méditerranéenne : Étude morphologique*, Paris, 590 p.

Beven K. J., Kirkby M. J., 1979, A physically based variable contributing area model of basin hydrology, *Hydrological sciences bulletin*, 29, 43-69.

Chafchafi A., 1994, Méthodes morphostructurales : applications à la connaissance du socle du Velay, Thèse de doctorat de 3ème cycle, Université Jean Monnet, Saint-Étienne, 296 p.

Etlicher B., 1986, Les massifs du Forez, du Pilat et du Vivarais : régionalisation et dynamique des héritages glaciaires et périglaciaires en moyenne montagne cristalline, Doctorat d'État, Université Lyon II, 687 p.

Etlicher B., 2004, French and Belgian Uplands, in Koster E. A. (ed.) *The Physical Geography of Western Europe*, Oxford University Press, 231-241.

Etlicher B., Bessaney C., 1996, Intégration des choix techniques et décisions politiques dans un projet de SIG environnemental: le SIG des Hautes Chaumes du Forez, *Revue de Géographie de Lyon*, 71, 111-120.

Florinsky I. V., 2000, Relationships between topographically expressed zones of flow accumulation and sites of fault intersection: Analysis by means of digital terrain modeling, *Environmental Modelling and Software*, 15, 87-100.

Freytet P., 1988, Quelques réflexions à propos du relief limousin, *Norois*, 35, 201-221.

Freytet P., Morel J.-L., 1987, Réhabilitation de la morphométrie en tant que méthode d'étude des surfaces d'aplanissement, *Revue de géomorphologique dynamique*, 31 ; 3, 77-78.

Godard O., Lagasquie J.-J., Lageat Y., 1994, *Les régions de socle. Apports d'une école française de Géomorphologie*, Presses universitaires Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 328 p.

Klein C., 1975, Massif armoricain et Bassin parisien. Contribution à l'étude géologique et géomorphologique d'un massif ancien et de ses enveloppes sédimentaires, Thèse, Presses universitaires de Strasbourg, 882 p.

Klein C., 1986, Le relief du Limousin. Les avatars d'un géomorphotype, *Norois*, 33, 23-49.

Klein C., 1990, *L'évolution géomorphologique de l'Europe hercynienne occidentale et centrale. Aspects régionaux et essai de synthèse. Mémoires et Documents de Géographie*, Ed. CNRS, Paris, 178 p.

Klein C., 1997, *Du polycyclisme à l'acyclisme en géomorphologie*, Ophrys, 299 p.

Le Griel A., 1991, L'évolution géomorphologique du Massif central français. Essai sur la genèse d'un relief, Thèse d'État, Université Lyon II, 2 tomes, 660 p.

Lerouge G., Freytet P., 1988, Le Sud Est du Massif Armoricain et le Nord Ouest du Massif Central : essai de reconstitution de la néotectonique par l'analyse structurale et géomorphologique, *Géologie de la France*, 4, 41-54.

Mazagol P.-O., 2006, Recherche de variables contribuant à l'organisation d'un paysage de moyenne montagne : le cas des Hautes Chaumes du Forez, Thèse de doctorat de 3ème cycle., Université Jean Monnet, Saint-Étienne, 302 p.

Moore I. D., Grayson R. B., Ladson A. R., 1991, Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications, *Hydrological Processes*, 5, 3-30.

Porteret J., 2008, Fonctionnement hydraulique et hydrologique des têtes de bassin versant du Nord-Est du Massif Central, Thèse de doctorat de 3ème cycle (en cours), Université Jean Monnet, Saint-Étienne, 350 p.

Valadas B., 1984, Les hautes terres du Massif Central : contribution à l'étude des morphodynamiques récentes sur versants cristallins et volcaniques, Doctorat d'Etat, Université de Paris I -Panthéon-Sorbonne, Paris, 927 p.

Wood J., 1996, The geomorphological characterisation of Digital Elevation Models, PhD Thesis, University of Leicester, 185 p.