

RAPPORTS

CETE
Normandie Centre

Laboratoire
Régional des
Ponts et Chaussées
de Blois

Affaire n°118810

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Opération de recherche 11M081 *Sujet n°2*

Étude bibliographique de trois
méthodologies appliquées au
risque érosion. Synthèse et
perspectives en vue d'une
cartographie départementale du
risque ruissellement

Août 2009



Ressources, territoires, habitats et logement
Énergie et climat
Prévention des risques
Développement durable
Infrastructures, transports et mer

**Présent
pour
l'avenir**

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DE L'ÉNERGIE,
DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE LA MER
en charge des Technologies vertes et des Négociations sur le climat

www.cete-normandie-centre.developpement-durable.gouv.fr

Historique des versions du document

Date	Version	Auteur	Commentaires
22/07/2009	A	Stéphane PINEY	Rapport initial (41 p.)
25/08/2009	B	Stéphane PINEY	Rapport intégrant les remarques suite à relecture (41 p.).

Affaire suivie par

Stéphane PINEY - Département Sciences de l'Environnement - Unité Technique Cours d'Eau

Tél. : 02 54 55 48 65 - fax : 02 54 55 48 71

Mél : stephane.piney@developpement-durable.gouv.fr

Destinataires

Réseau Scientifique et Technique

A l'attention de Monsieur Éric GAUME (L.C.P.C.) (1 ex.)
A l'attention de Monsieur Frédéric PONS (CETE Méditerranée)..... (1 ex.)
A l'attention de Messieurs Emmanuel BERTHIER et Paul GUERO (LROP).... (1 ex.)

Département « Sciences de l'Environnement » (1 ex.)
Secrétariat (affaire 114590)..... (1 ex.)
Centre de Gestion CG4 / 85

SOMMAIRE

Introduction.....	4
 1.- L'aptitude des surfaces élémentaires au ruissellement : la fonction de production.....	5
1.1.- Érosion diffuse et érosion concentrée, typologie de l'érosion	5
1.2.- Les paramètres d'entrée des différentes méthodologies	7
1.3.- La délimitation en classes des données, et leur croisement : la méthodologie mise en œuvre en vue de caractériser l'aléa ruissellement ou érosion dans les 3 méthodologies analysées.....	8
1.3.1.- La méthodologie développée par la faculté universitaire des sciences agronomiques de Gembloux en vue de qualification du risque ruissellement.....	8
1.3.2.- La méthodologie INRA/BRGM	10
1.3.3.- Le modèle SCALES du laboratoire Geophen de l'université de Caen	13
1.4.- Les données disponibles, échelle du rendu et cartographie obtenue, et validation.....	18
1.4.1.- La méthodologie développée par la faculté universitaire des sciences agronomiques de Gembloux en vue de la qualification du risque ruissellement.....	18
1.4.2.- La méthodologie INRA/BRGM	19
1.4.3.- Le modèle SCALES du laboratoire Geophen de l'université de Caen	22
1.5.- Première synthèse relative à la fonction de production liée au ruissellement par refus d'infiltration (hortonien)	26
 2.- Dynamique à l'échelle du bassin versant	27
2.1.- Dynamique à l'échelle du bassin versant élémentaire (une dizaine de km ²)	28
2.1.1.- Dynamique spatiale du ruissellement hortonien	28
2.1.2.- Une autre dynamique à l'échelle du versant : celle mise en évidence à travers un fonctionnement du type aires contributives saturées.....	31
2.2.- Dynamique à l'échelle du bassin versant (au delà d'une dizaine de km ²)	32
2.2.1.- Ruissellement concentré : détermination des espaces de concentration.....	32
2.2.2.- Vers une classification des talwegs	33
 3.- Éléments de synthèse en vue d'une cartographie du risque ruissellement.....	35
3.1.- Quelques éléments issus des retours d'expérience menés par le L.R.P.C.de Blois de 2002 à 2004 en région Centre, relatifs à des événements intenses estivaux	36
3.2.- Typologie des événements pluviométriques à l'origine des phénomènes de ruissellement dans le pays de Caux, l'exemple du bassin versant de la Lézarde en pays Cauchois, et l'expérience acquise par la CODAH	36
3.3.- Conclusion : vers une méthodologie de complexité progressive de la cartographie du risque ruissellement	39

Introduction

Essentiellement bibliographique, le présent rapport a pour objet de comparer dans la perspective de la réalisation d'une cartographie départementale du risque ruissellement, les trois méthodologies suivantes :

- [1] Cartographie des zones à risque de ruissellement et d'érosion en région Wallonne : méthodologie et cas pilotes. S. Dautrebande, et Ir. F. Colard. Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux. 87 p., février 2003 ;
- [2] Guide méthodologique pour un zonage départemental de l'érosion des sols. Rapport n°3 : Synthèse et recommandations générales. Cerdan O., Le Bissonnais Y., Souchère V., King C., Antoni V., Surdyk N., Dubus I., Arrouays D., Desprats J. F.. BRGM, INRA, 85 p., décembre 2006 ;
- [3] Modélisation et cartographie de l'aléa érosion des sols et des espaces de ruissellement dans le département du Calvados. Rapport d'étude. P. Le Gouée et D. Delahaye. Laboratoire Geophen, université de Caen Basse Normandie. 235 p., septembre 2008.

Notre rapport porte essentiellement sur l'application de ces méthodologies en vue d'une application en régions tempérées, même si la méthodologie développée en [2] apparaît aussi pouvoir s'appliquer en région méditerranéenne¹.

Comme on le verra dans la suite de ce rapport, les objectifs, les domaines d'application, et en particulier les échelles de mises en œuvre, de ces trois méthodologies sont relativement distincts. En outre, ces études se concentrent pour une bonne part d'entre elles, sur l'aspect « production potentielle » ou « aptitude des sols au ruissellement ».

Nous avons donc retenu d'organiser ce rapport de la façon suivante.

Dans une première partie, on comparera et analysera les trois méthodologies mises en œuvre ci-dessus dans la perspective d'une cartographie de l'aptitude des sols au ruissellement. Cette première partie s'attachera à définir non seulement les différents paramètres d'entrée des modèles et leurs disponibilités, mais aussi l'organisation des modèles à savoir, comment se combinent ces paramètres avant d'aboutir à la qualification de l'aléa érosion. Elle évoquera aussi la cartographie obtenue, l'échelle des rendus et la validation de ces modèles.

En terme d'hydrologie, nous sommes ici dans le champ de *la fonction de production*.

Dans une seconde partie, on abordera l'aspect dynamique, puis de concentration du ruissellement. A savoir, comment de l'aptitude potentielle des sols au ruissellement, on passe à sa combinaison puis à sa concentration, vers et dans le réseau hydrographique. On sera aussi amené à élargir le champ de la production potentielle au ruissellement, par refus d'infiltration (ruissellement hortonien), objet essentiel de la première partie, en évoquant celui de nappe de versant, de ruissellement de subsurface, et d'aires contributives saturées. En terme d'hydrologie, nous sommes ici dans le champ de *la fonction de transfert*.

Enfin, dans une troisième partie conclusive, on s'attachera à définir des perspectives de travail, en vue de la réalisation à l'échelle départementale d'une cartographie du risque ruissellement, au regard de

¹ On trouvera ainsi dans Modélisation de l'aléa érosif des sols en contexte méditerranéen à l'aide d'un Référentiel Régional Pédologique au 1/250 000 et confrontation aux enjeux locaux. Étude et Gestion des Sols, Volume 13, 3, 2006 - p. 201 à 222 V. Antoni et al. 2006, de nouvelles règles de pédotransfert déterminées pour la région méditerranéenne.

l'ensemble des études et des expériences analysées précédemment. La notion de risque est ici limitée (voire impropre) : elle se borne à celle de la cartographie des zones de production ou de concentration du ruissellement, sans qualification de l'aléa (hauteur, vitesse...), ni croisement avec les enjeux existants.

1.- L'aptitude des surfaces élémentaires au ruissellement : la fonction de production

Comme on le verra, les modèles que nous avons choisi de décrire, qui visent plus largement à qualifier l'aléa érosion à l'échelle de bassins versants, abordent essentiellement un processus que l'on qualifiera « d'hortonien » de génération du ruissellement par refus d'infiltration, effectivement le seul susceptible de générer de l'érosion (entraînement de particules), via un ruissellement de surface. Ce ruissellement de surface, diffus ou concentré, étant non seulement lié aux propriétés intrinsèques du sol (à savoir sa capacité d'infiltration au regard de l'intensité de la pluie), mais aussi (surtout) à son état de surface, à savoir : sa couverture végétale, son aptitude du sol à générer une croûte de battance (cf. « organisations pelliculaires de surface »), et à son histoire (cf. [11]).

Aussi au cœur de ces modèles, on trouve une analyse fine de la pédologie, et une cartographie des sols à l'échelle départementale, dont il ne nous est guère possible de réaliser une étude comparative, critique, de la méthodologie mise en oeuvre, tant ce champ est loin de nos compétences. Aussi, sur ce point particulier on soulignera davantage les limites de chacune de ces méthodologies révélées par leurs auteurs à l'issue d'étapes de validation, et leur domaine d'application respective.

Avant d'aborder cette étude comparative, il nous paraît nécessaire de préciser quelles notions et processus sous tendent les méthodologies que nous souhaitons comparer, à savoir en particulier les notions d'érosion diffuse et d'érosion concentrée.

1.1.- Érosion diffuse et érosion concentrée, typologie de l'érosion

Dans le cadre de la cartographie de l'aléa érosion, les auteurs s'attachent à distinguer le ruissellement diffus et le ruissellement concentré. Dans le premier cas, c'est l'énergie des gouttes de pluie qui sera principalement à l'origine du transport solide et de l'érosion, dans le second, l'énergie propre au ruissellement (cf. [12], chap. 1 : synthèse bibliographique).

Dans le cas de l'érosion diffuse (interrang), O. Cerdan dans [12] décrit l'influence respective dans le phénomène d'érosion, de la nappe ruisselante, de l'impact des gouttes de pluie, du stade de développement des croûtes, de la pente et de la microtopographie.

Il indique la faible capacité du ruissellement diffus à mobiliser les sols sans l'énergie des gouttes de pluie, qui apparaît déterminante. L'énergie du ruissellement étant elle-même fortement influencée par l'état de surface du sol, la microtopographie, et le couvert végétal.

La charge solide est fortement dépendante du stade de développement des croûtes : elle a tendance à diminuer au fur et à mesure de l'événement, dans la mesure où les particules plus facilement mobilisables sont déjà mobilisées. Si l'atténuation de la rugosité et le développement d'une croûte peuvent aussi réduire la quantité de particules mobilisables, elle a tendance à augmenter le ruissellement (diminution de l'infiltration), et donc la possibilité d'une érosion par ce même ruissellement diffus. Il s'agit donc d'une « fonction complexe de l'ensemble des facteurs, qui ont parfois eux-mêmes des influences contradictoires ».

L'érosion par la pluie apparaît aussi augmenter de façon significative avec la pente des surfaces. Elle apparaît directement liée à une augmentation du volume ruisselé pour une même pluie (augmentation du ruissellement), et de la vitesse (capacité à l'arrachement des particules).

Enfin l'influence de la microtopographie est aussi déterminante, tant les lames d'eau écoulées sont minces, et l'influence de la rugosité déterminante dans les paramètres hydrauliques (h , V) du ruissellement conduisant à la mobilisation des particules.

La naissance de l'érosion concentrée a fait l'objet de nombreuses études, les auteurs cherchant à déterminer les conditions limites de formation des rigoles (cf. [12]). Elle apparaît directement liée au dépassement d'une force tractrice limite, exprimée sous forme de « vitesse de cisaillement », « de contrainte de cisaillement de surface », « de puissance de l'écoulement », ou « de débit total ou unitaire ».

Enfin, « l'équilibre dans l'expression d'un système rang/interrang est aussi fonction du régime pluviométrique. L'érosion interrill (diffuse) est souvent dominante dans le cas de pluies intermittentes de faible intensité où la quantité de sédiments détachés a plutôt tendance à combler les incisions existantes qu'à en créer de nouvelles. Pour des pluies d'intensité élevée, l'évacuation dans les incisions dépasse la quantité de sédiments détachés par les processus interrang, et le réseau d'incisions a tendance à s'étendre. » (O. Cerdan dans [12]). Ainsi, l'apparition de ces deux types d'érosion est aussi directement liée, indépendamment de la couverture des sols, à des événements pluviométriques relativement distincts et marqués en terme de saison.

Cette distinction érosion diffuse/érosion concentrée se retrouve dans la méthodologie wallonne ([1]), où on retrouve l'influence déterminante des paramètres cités précédemment en fonction de chaque type d'érosion. « L'érosion diffuse sur un site donné est fonction des intensités pluviométriques et du ruissellement diffus à la surface, y compris les premiers millimètres du sol. (...) L'érosion concentrée se traduit par des effets de ravinements des terres, plus ou moins prononcés, suite à la concentration des eaux de ruissellement atteignant localement des vitesses érosives. »

Les deux autres méthodologies étudiées ([2] et [3]) examinent conjointement ces deux types d'érosion, et proposent une typologie différente.

On trouvera ainsi dans Erosion hydrique des sols en France, INRA IFEN [8] une typologie générale de l'érosion en France (p. 10 à 17), qui a servi au travail de définition de la méthodologie retenue par l'INRA et le BRGM en vue d'une cartographie départementale de l'aléa érosion [3]. Elle distingue 4 types généraux d'érosion : érosion en région de grandes cultures (type 1), érosion de vignobles et vergers (type 2), érosion de montagne (type 3) et érosion méditerranéenne (type 4), chacun de ces types étant décliné de la façon suivante :

Type 1 érosion en régions de grande culture		Type 2 érosion de vignobles et vergers		Type 3 érosion de montagne
1a : érosion automnale et hivernale par concentration du ruissellement	1b : érosion lors des orages de printemps et d'été	2a : érosion dans les vignobles par concentration du ruissellement	2b érosion dans les vignobles par décapage d'un sol ameubli	<u>Sans ordre de classement (ici) :</u> - la pente (souvent supérieure à 30 %) - l'intensité des précipitations (généralement élevées en toutes saisons) - l'érodibilité des terrains (matériaux parentaux instables qui peuvent être le siège de mouvements de terrains ou de ravinements importants).
- l'occupation des sols (absence de protection par un couvert végétal) ; - la sensibilité à la battance.	- la pente si les sols ne sont pas battus, et la sensibilité à la battance si les sols n'ont pas été retravaillés ; - l'intensité des précipitations ; - l'occupation des sols (absence de protection par un couvert végétal).	- les pentes et la sensibilité à la battance (pentes fortes pour une battance moyenne et pentes faibles pour une battance forte) ; - l'occupation des sols (taille des parcelles et localisation dans le paysage agricole).		
1c : succession des types 1a et 1b		2c : succession des deux phénomènes érosifs sur un même coteau		

Tableau 1 : typologie des phénomènes érosifs et facteurs déclenchant classés par ordre décroissant (hors érosion méditerranéenne). Y. Le Bissonnais et al. [8]

La méthodologie développée par P. Le Goué du laboratoire Geophen de l'université de Caen [2] définit, préalablement à la construction d'une méthodologie à même de cartographier l'ensemble des phénomènes d'érosion, 4 types d'érosion, propres au département du Calvados, et pour chacun d'entre eux les facteurs déterminants dans l'apparition de ce phénomène.

<u>Type 1</u> : érosion dans les grandes parcelles à faible pente, sur sol épais, à <u>structure instable</u> ²	<u>Type 2</u> : érosion dans les parcelles à pente assez faible, sur sol peu épais et à structure moyennement stable	<u>Type 3</u> : érosion dans les parcelles à pente assez forte à forte, <u>sur sol peu épais et sur substrat rocheux imperméable</u>	<u>Type 4</u> : érosion dans les parcelles à pente faible et assez faible, sur sol moyennement stable, peu épais et <u>reposant sur un niveau argileux</u>
- instabilité structurale des éléments de surface - agressivité des pluies - état de surface pendant l'interculture - grande superficie des parcelles.	2a³ - l'instabilité structurale des horizons de surface - la faible capacité de stockage en eau du sol - des pluies à la fois agressives et entretenant un état prolongé de saturation du sol - des pentes de 2 à 5% - l'état de surface des sols pendant l'interculture. 2b (fin du printemps et période estivale) - le caractère orageux des pluies - l'instabilité structurale des horizons de surface - la faible capacité de stockage en eau du sol - l'état de surface des sols.	- la faible capacité de stockage en eau du sol - l'abondance des précipitations - l'imperméabilité du substrat rocheux - les fortes pentes	- la faible capacité de stockage en eau du sol - l'existence de niveaux argileux imperméables - l'instabilité structurale relative - les faibles pentes

Tableau 2 : les 4 types d'érosion des sols rencontrés dans le Calvados, et les facteurs intervenants dans l'apparition de ce type d'érosion, classés par ordre décroissant. P. Le Goué [3]

1.2.- Les paramètres d'entrée des différentes méthodologies

En fonction des typologies d'érosion mises en évidence ci-dessus, les 3 méthodologies décrites retiennent différents paramètres d'entrée.

Au préalable, il convient de souligner que la méthodologie wallonne [1] distingue le risque érosion du risque ruissellement. Aussi, dans les paramètres décrits ci-dessous nous ne retiendrons que les paramètres déterminants au regard de ce risque, compte tenu de l'objectif dans lequel s'inscrit notre travail : ils se distinguent ainsi de ceux retenus dans le cadre des deux autres méthodologies ([2] et [3]), pour lesquels nous examinerons plus particulièrement, au chapitre 1.5., dans quelle mesure ils apparaissent hydrologiquement déterminants en vue de caractériser une fonction de production du ruissellement.

La caractérisation de ces paramètres (données d'entrées) va dépendre aussi des données effectivement disponibles, ce que nous proposons d'examiner au chapitre 1.4. pour chacune des méthodes.

² Sols battants

³ « La battance est ici moins prononcée que dans le cas précédent (fraction limoneuse moins importante et teneur en matière organique et/ou carbonates suffisamment élevée pour assurer une relative stabilité structurale) ».

La méthodologie wallonne en vue du classement des zones à risque ⁴ <u>ruissellement</u>	La méthodologie INRA/BRGM de cartographie de <u>l'aléa érosion</u>	Le modèle SCALES (laboratoire Géophen de l'université de Caen) en vue de caractériser <u>l'aléa érosion</u>
<i>Ruissellement diffus</i> - l'occupation des sols - la carte des sols - la topographie - les données météorologiques <i>Ruissellement concentré</i> - la carte des sols - les axes des vallons secs - la topographie - le réseau hydrographique	- l'occupation des sols - la battance - la pente - l'érodibilité + - le climat.	- l'érodibilité des sols - les pratiques agricoles - la topographie - l'érosivité pluviale

Tableau 3 : les paramètres d'entrée des différents modèles de caractérisation de l'aléa érosion

1.3.- La délimitation en classes des données, et leur croisement : la méthodologie mise en œuvre en vue de caractériser l'aléa ruissellement ou érosion dans les 3 méthodologies analysées

1.3.1.- La méthodologie développée par la faculté universitaire des sciences agronomiques de Gembloux en vue de la qualification du risque ruissellement (S. Dautrebande et Ir. F. Colard, [1])

Comme on l'a vu précédemment, cette méthodologie distingue le risque lié au ruissellement diffus du risque lié au ruissellement concentré.

a) le ruissellement diffus (p. 47 à 54 de [1]) : application de la méthode du SCS

La cartographie des risques liés au ruissellement diffus est abordée via l'utilisation de la méthode du SCS (Soil Conservation Service). « Elle consiste en la détermination pixel par pixel, de taux (coefficients) de ruissellement potentiels en réponse à une pluie de référence, fixée en intensité, durée et fréquence, pour les sols, topographies et occupation du sols considérés, dans des conditions d'humidité des sols du bassin versant sèches, humides, très humides. Dans le contexte du classement des risques, l'humidité des sols « au moment » de l'averse de référence est considérée en conditions moyennes d'humidité des sols. »

Le SCS a établi empiriquement une relation existant entre la hauteur d'eau ruisselée R (mm) et la hauteur précipitée P (mm) dans des conditions de sol, de pente, d'occupation et d'humidité des sols données. Cette formulation repose sur l'hypothèse principale que le rapport du ruissellement R (mm) à la pluie utile (pluie non interceptée, disponible au ruissellement $P_u = P - S_0$) est égal au rapport de ce qui s'est déjà infiltré à ce qui peut s'infiltrer au maximum S(mm).

Le terme $S_0 = 0,2S$ représente l'interception (hauteur interceptée par les végétaux ou servant à remplir les dépressions de la surface du sol), le terme S (mm) la capacité d'infiltration totale.

$$R = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S}$$

avec : R (mm) : hauteur ruisselée en mm
P (mm) : hauteur de précipitation en mm
S (mm) : paramètre d'infiltration maximale dépendant du type de sol, de son humidité, de la pente et de l'utilisation du sol.

⁴ La méthodologie développée par l'université de Gembloux utilise le terme de risque, que nous conserverons dans la suite de ce rapport, même si celui de caractérisation de la fonction de production nous paraît plus adapté dans la mesure où il n'y a ni caractérisation de l'aléa (hauteur, vitesse), ni croisement avec les enjeux dans le cadre de l'élaboration des cartes de « risques ».

Aussi, le paramètre le plus délicat à déterminer est S (mm), paramètre d'infiltration maximale qui dépend de la nature du sol, de son couvert végétal et de son état d'humidité initial. En pratique, S (mm) est remplacé par le *Curve Number (CN)* qui varie de 0 (« perméabilité totale ») à 100 (« imperméabilité totale »).

$$CN = \frac{1000}{10 + S}, \text{ avec } S \text{ en inches.}$$

L'évaluation du *Curve Number* est la plus délicate. La méthodologie développée par la faculté universitaire de Gembloux propose une évaluation des *Curve Number*, qui passe par :

- un classement hydrologique de l'occupation du sol (sensibilité au ruissellement) ;
- l'évaluation de la pente des terres, évaluée au départ d'un MNT ;
- un classement hydrologique des sols (quatre classes, conformément à la méthode du SCS), en fonction de leurs caractéristiques d'infiltrabilité.

Il est à noter que la méthode du SCS prévoit initialement la détermination de trois *Curve Number* : CN1 (CN min), CN2 (CN moyen) et CN3 (CN max) fonction de l'état « d'humidité » des sols, et liés aux pluies antérieures. Au niveau de la méthodologie Wallonne, c'est la valeur du CN2 qui est déterminée (conditions d'humidité moyennes).

L'occupation du sol a été déterminée sous l'angle hydrologique, en se basant sur les tables déterminées dans le cadre des modèles EPIC ou SWAT⁵.

Le classement hydrologique des sols en 4 classes (A à D) (cf. Ven te Chow 1964, Maidment, 1993) s'effectue suivant le tableau ci-dessous.

Types de sols des cartes des sols 1/20000	Types de sols de la carte des associations de sols de Belgique	Groupe hydrologique des sols
<i>Sols des plateaux et des pentes</i>		
Sols limoneux profonds		
Classe de drainage favorable à modéré (b-c)	Sols limoneux des classes 30 à 32	A
Classe de drainage imparfait ou pire (d- -->)	Sols limoneux des classes 33 à 36	B
Sols limoneux peu profonds		
Classe de drainage favorable à modéré (b-c)	Sols limoneux des classes 30 à 32	B
Classe de drainage imparfait ou pire (d- -->)	Sols limoneux des classes 33 à 36	B
Sols sablo-limoneux profonds	Sols sablo-limoneux ou limoneux des classes 38 et 39	
Classe de drainage favorable à modéré (b-c)		B
Classe de drainage imparfait ou pire (d- -->)		C
Sols sablo-limoneux peu profonds	Sols sablo-limoneux ou limoneux des classes 38 et 39	C
Sols limono-sableux	Sols sableux et limono-sableux des classes 15, 16, et 21	A
Sols sableux	Sols sableux des classes 23 à 25	A
Sols limono-caillouteux	Sols limono-caillouteux et limoneux peu caillouteux des classes 40 à 48 et 50 à 53	
Classe de drainage favorable à modéré (b-c-d)		B
Classe de drainage imparfait ou pire (e- -->)		C
Sols argileux	Sols argileux des classes 57 et 58	
Classe de drainage favorable à modéré (b-c)		C
Classe de drainage imparfait ou pire (d- -->)		D
<i>Sols des vallées et dépressions</i>		
Sols sur matériaux limoneux	Sols alluviaux des classes 59 à 61	C
Sols sur matériaux limoneux ou limono-caillouteux	Sols alluviaux des classes 59 à 61	C
Sols sur matériaux sablo-limoneux	Sols alluviaux des classes 59 à 61	C
Sols sur matériaux argileux	Sols alluviaux des classes 59 à 61	D
Sols sur matériaux tourbeux	Sols tourbeux classe 54	A
<i>Sols artificiels</i>	Pas de correspondance	

Tableau 4 : association des sols des cartes des sols au 1/20000 et des sols de la carte des associations de sols de Belgique et valeurs de groupes hydrologiques correspondants. S. Dautrebande et Ir. F. Colard. [1]

Le croisement des deux tables précédentes permet d'aboutir à la détermination du CN2. Le calcul d'un « CN2S » tenant compte de la pente est issu de la formulation EPIC (ou SWAT).

Enfin, l'association des valeurs des différents *Curve Number*, aux données météorologiques (pluie centennale de durée 1h⁶) permet d'aboutir à la détermination des coefficients de ruissellement,

⁵ Cf. précision de S. Dautrebande, contactée par mail.

objet du rendu cartographique des zones à « risques » en terme de ruissellement diffus. Elle passe par le calcul de la lame d'eau ruisselé maille par maille, effectuée par tranche de hauteurs précipitées. 4 classes de coefficients sont finalement déterminées : < 5% ; [5 ; 20 %] ; [20 ; 40 %] ; et >= 40 %.

b) le ruissellement concentré (p. 61 à 69 de [1])

La cartographie des zones à risque de ruissellement et d'érosion concentrés font l'objet d'un même rendu cartographique. Elle repose sur la superposition des couches d'informations suivantes (il n'y pas « combinaison » de ces informations) :

- les pentes, pour lesquels trois classes sont identifiées < 5% ; 5% < l < 7% et > 7% ;
- les superficies des bassins versants drainées par les axes naturels > 1 ha ; > 9 ha ; > 18ha ;
- la représentation du réseau de voiries.

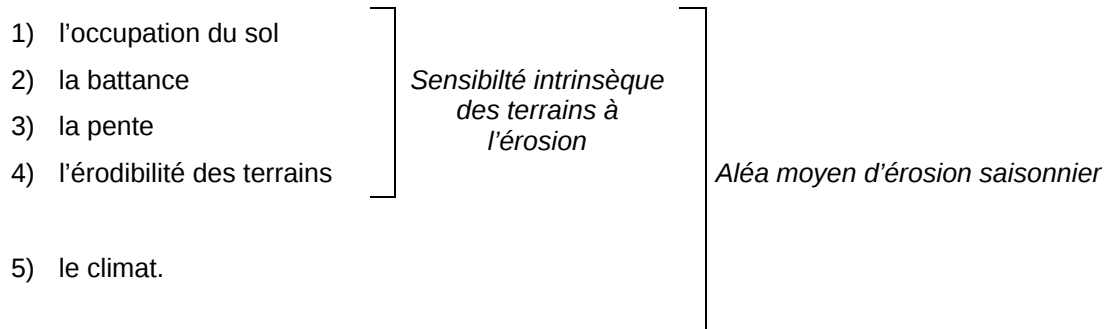
La détermination de ces différents paramètres passe par l'exploitation de l'outil de modélisation hydrologique du module Grid d'Arc Info d'un modèle numérique de terrain disponible sous format Grid.

1.3.2.- La méthodologie INRA/BRGM (O. Cerdan, Y. Le Bissonnais et al.) [2]

a) architecture du modèle et croisement des données

La méthodologie proposée par l'INRA se présente sous forme d'un arbre de décision, sur l'hypothèse que 4 facteurs sont « nécessaires et suffisants » pour expliquer l'aléa érosion : le sol, l'occupation du sol, la topographie et le climat.

Les critères apparaissent dans l'arbre de décision dans l'ordre suivant :



Ainsi, dans la définition de la sensibilité intrinsèque des terrains à l'érosion, les données interviennent de façon hiérarchisée : il a été retenu de privilégier les facteurs sur lesquels les activités humaines peuvent avoir une influence.

⁶ La faible durée de l'événement retenu est liée à la faible surface des bassins versants cartographiées ici, et donc à un temps de concentration faible (cf. S. Dautrebande).

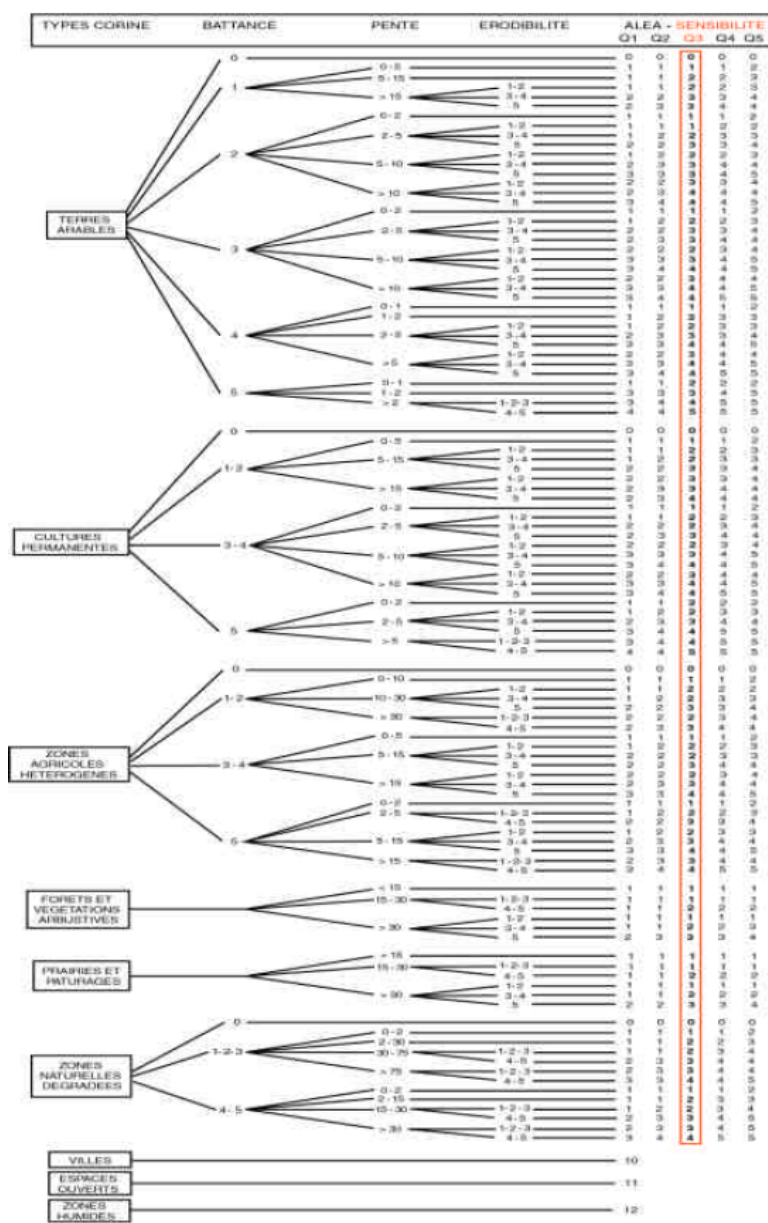


Figure 1 : modèle arborescent pour le calcul de l'aléa érosion (O. Cerdan, Y. Le Bissonnais et al., [2])

b) la classification des données d'entrée

• L'occupation des sols

L'occupation des sols repose sur l'exploitation des données cartographiques CORINE Land Cover, qui comprend 5 grands ensembles, détaillés en 44 sous-types. Ces sous-types ont été rassemblés en 9 catégories d'occupation :

- terres arables ;
- prairies et pâturages ;
- zones agricoles hétérogènes ;
- cultures permanentes ;
- zones naturelles dégradées ;
- forêts et zones arbustives ;
- espaces couverts ;
- zones d'eau libre ;
- terroirs artificialisés.

Pour chaque type d'occupation du sol (types Corine Land Cover reclassés en 9 catégories) sont donnés une sensibilité du sol à la battance

(0 = sensibilité nulle, 1 = très faible, 2 = faible, 3 = moyenne, 4 = assez forte, 5 = très forte), une classe de pente (en %), et une sensibilité à l'érodibilité du matériau parental (0 = érodibilité nulle, 1 = très faible, 2 = faible, 3 = moyenne, 4 = assez forte, 5 = très forte).

Pour chacune des combinaisons de ces facteurs, la Sensibilité des terrains à l'érosion (Q3) ainsi définie, est augmentée ou diminuée en fonction d'un indice combinant intensité et hauteur des précipitations, classé en quintiles (Q1 = indice de précipitations faible, à Q5 = fort), afin d'obtenir un niveau d'aléa pour ces terrains (0 = aléa nul, 1 = très faible, 2 = faible, 3 = moyen, 4 = assez fort, 5 = très fort). Ainsi, pour un aléa égal à 5, la possibilité de rencontrer des problèmes d'érosion sur ces terrains est très forte.

Exemple : sur des terres arables, lorsque la battance est assez forte (classe 4), que la pente moyenne est comprise entre 2 et 5%, que l'érodibilité est moyenne (classe 3 et 4), l'aléa érosif peut être faible (2) lorsque les pluies sont faibles (Q1), moyen, ou assez élevé (classe 4) lorsque les pluies sont fortes (Q5).

- La battance et l'érodibilité

La battance est une dégradation liée à l'instabilité structurale des sols en surface qui entraîne une diminution importante de l'infiltrabilité et de la rugosité des sols. Elle engendre une érosion diffuse lors du ruissellement puis, en cas de concentration des flux, la formation de ravinements.

L'érodibilité correspond à la stabilité et à la cohésion des sols, c'est-à-dire à leur résistance au cisaillement et à leur plus ou moins grande facilité à être mobilisés par le ruissellement.

Ces deux paramètres (5 classes pour chacun d'entre eux) sont déterminés en fonction des règles de pédotransferts suivantes :

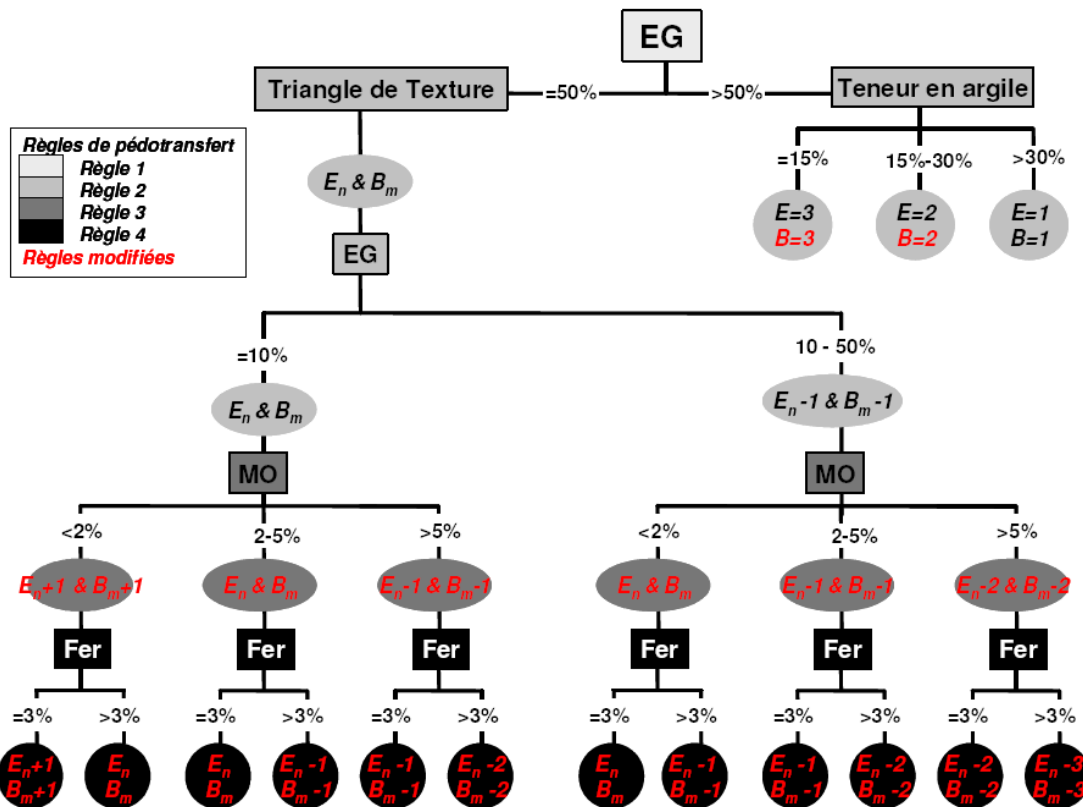


Figure 2 : nouvelle version des règles de pédotransfert pour estimer les facteurs de battance et d'érodibilité sur le territoire métropolitain (EG : abondance en éléments grossiers en %. MO : abondance de la matière organique en %. E : érodibilité, B : battance, 1 : très faible, 2 : faible, 3 : moyenne, 4 : forte, 5 : très forte). (O. Cerdan, Y. Le Bissonnais et al., [2])

- Les pentes

Les valeurs ont été regroupées en 3 classes : [0-5%] ; [5-15%] ; >=15%.

- Le climat

La sensibilité intrinsèque des sols à l'érosion est croisée avec le facteur climatique, dont le potentiel érosif est déterminé par le croisement des classes de hauteurs et d'intensité.

Les classes de hauteurs ont été déterminées via l'exploitation des hauteurs de précipitation moyenne sur 30 ans des stations de Météo France. Le nombre de stations disposant de données d'observation assez longues n'étant pas suffisant, la représentativité des pluies a été améliorée via la méthode AURELY (Analyse Utilisant le RELief pour l'Hydrométéorologie) ; elle permet de tenir compte des particularités topographiques de chaque point. Les valeurs de hauteurs de précipitations moyennes ont ensuite été reclassées en quintiles normalisés pour chaque saison climatique (5 classes).

L'intensité des pluies a été jugée par la fréquence moyenne par saison des hauteurs de pluies supérieures ou égales à 15 mm en 1h. Ce choix, suggestif, résulte d'un compromis entre une

précision nécessaire et une discrimination suffisante pour faire ressortir les fortes intensités des régions méditerranéennes. Les valeurs obtenues ont été regroupées en 3 classes.

Le croisement des classes de hauteurs et d'intensités s'effectue en fonction du tableau suivant : il permet d'obtenir 5 classes caractérisant le climat.

Classe sur la base de l'intensité →	intensité faible	intensité moyenne	intensité forte
Classe sur la base du volume ↓			
1	1	2	3
2	2	3	4
3	3	4	5
4	4	5	5
5	5	5	5

Tableau 5 : croisement des classes d'intensité et des classes de volume des pluies pour obtenir les classes d'agressivité du climat (O. Cerdan, Y. Le Bissonnais et al., [2])

1.3.3.- Le modèle SCALES du laboratoire Geophen de l'université de Caen (P. Le Goué) [3]

a) *architecture du modèle et croisement des données*

Le modèle SCALES⁷ développé par le laboratoire Geophen de l'université de Caen est un modèle arborescent, c'est à dire qu'il s'appuie sur une hiérarchisation des données d'entrées, selon leur importance dans la genèse du ruissellement érosif. On peut ainsi noter que « les durées d'interculture » ont moins d'influence sur le déclenchement du ruissellement érosif, que les « pentes » qui, elles mêmes, ont moins d'influence que « l'instabilité structurale ».

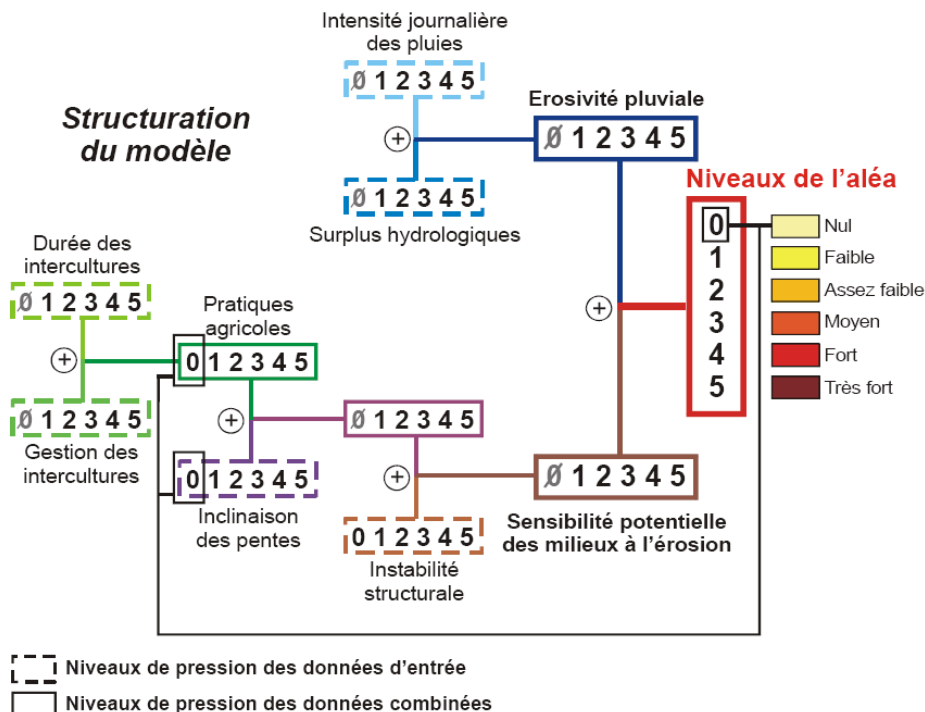


Figure 3 : Structure du modèle SCALES, P. Le Goué [3]

⁷ Spatialisation d'éChelle fine de l'ALéa Érosion des Sols.

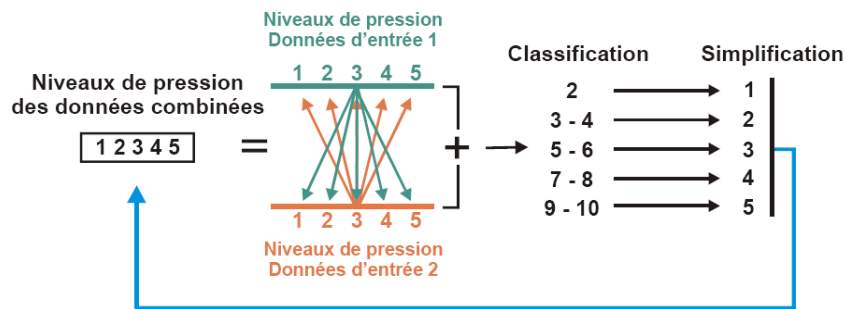


Figure 4 : Mode de combinaison des données au niveau du modèle SCALES, P. Le Goué [3]

b) les données d'entrée du modèle SCALES et leur classification

Les données d'entrée du modèle SCALES sont les suivantes :

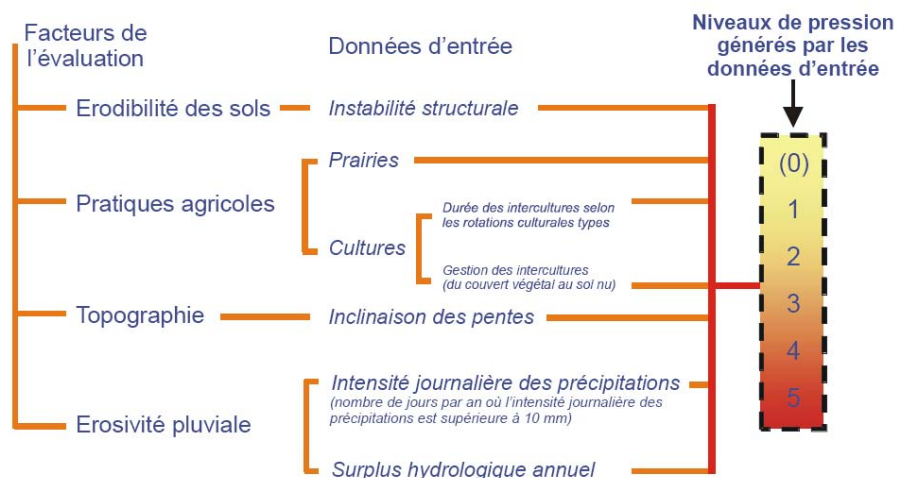


Figure 5 : les données d'entrée du modèle SCALES, P. Le Goué [3]

- L'érodibilité des sols

Pour estimer l'érodibilité des sols, le paramètre retenu est celui de l'instabilité structurale. Cette propriété renvoie à la sensibilité du sol à la dégradation de sa structure superficielle sous l'action des précipitations (renvoie à la notion de battance).

P. Le Goué dans [3] souligne qu'il faut cependant être conscient que la sensibilité du sol à l'érosion n'est pas toujours corrélée à la notion de battance et aux propriétés intrinsèques du sol qui conduisent à ce phénomène. Dans le cas par exemple de cumuls de pluie importants conjugués à des sols saturés, on observera la mise en place d'un ruissellement sur des sols non battants. Aussi, ce cas de figure est intégré au modèle SCALES, au niveau du facteur d'entrée érosivité pluviale, via la détermination de la réserve utile des sols, permettant de déterminer un surplus hydrologique annuel.

Aussi, la constitution d'une base de données Sol s'est avérée nécessaire. Elle a regroupé plus de 7514 sondages, pour lesquels ont été renseignés :

- la description des profils et horizons ;
- la description des caractères principaux : couleur, texture (cf. diagramme de texture), structures supposées, éléments grossiers, l'hydromorphie, et l'effervescence à l'acide chlorhydrique.

En parallèle à ces sondages terrains, 90 sites référents ont été retenus en vue de faire l'objet d'analyses en laboratoire, qui ont porté sur la granulométrie, la stabilité structurale, les pH_{eau} et pH_{KCl} , et la calcimétrie.

La stabilité structurale est définie par le diamètre moyen pondéral (MWD) qui définit des classes de stabilité/d'érodilité. 6 classes ont ainsi été déterminées, en fonction du diamètre moyen pondéral des agrégats ($\leq 0,4$ mm ;]0,4 - 0,8 mm] ;]0,8 - 1,3 mm] ;]1,3 - 2 mm] ;]2 - 3,5 mm] ; $> 3,5$ mm).

MWD	Stabilité	Battance	Ruissellement et érosion diffuse
$< 0,4$ mm	Très instable	Systématique	Risque important et permanent en toutes conditions topographiques
0,4 - 0,8 mm	Instable	Très fréquente	Risque fréquent en toute situation
0,8 - 1,3 mm	Moyennement stable	Fréquente	Risque variable en fonction des paramètres climatiques et topographiques
1,3 - 2,0 mm	Stable	Occasionnelle	Risque limité
$> 2,0$ mm	Très stable	Très rare	Risque très faible

Tableau 6 : détermination de l'instabilité structurale

La réserve utile n'a pas été directement déterminée en laboratoire, mais est issue des données granulométriques ; elle repose sur la méthode d'estimation des RU à partir de la connaissance des textures (Jamagne *et al.* 1977). Ainsi, une texture limono-argileuse (LA) a une réserve utile de 1,95 mm d'eau par cm d'épaisseur de sol. En fonction de l'épaisseur des sols, il est donc possible de déterminer la réserve utile. Elle a été corrigée dès lors que les sols présentaient des éléments grossiers.

Le module Sol est résumé dans le synoptique suivant :

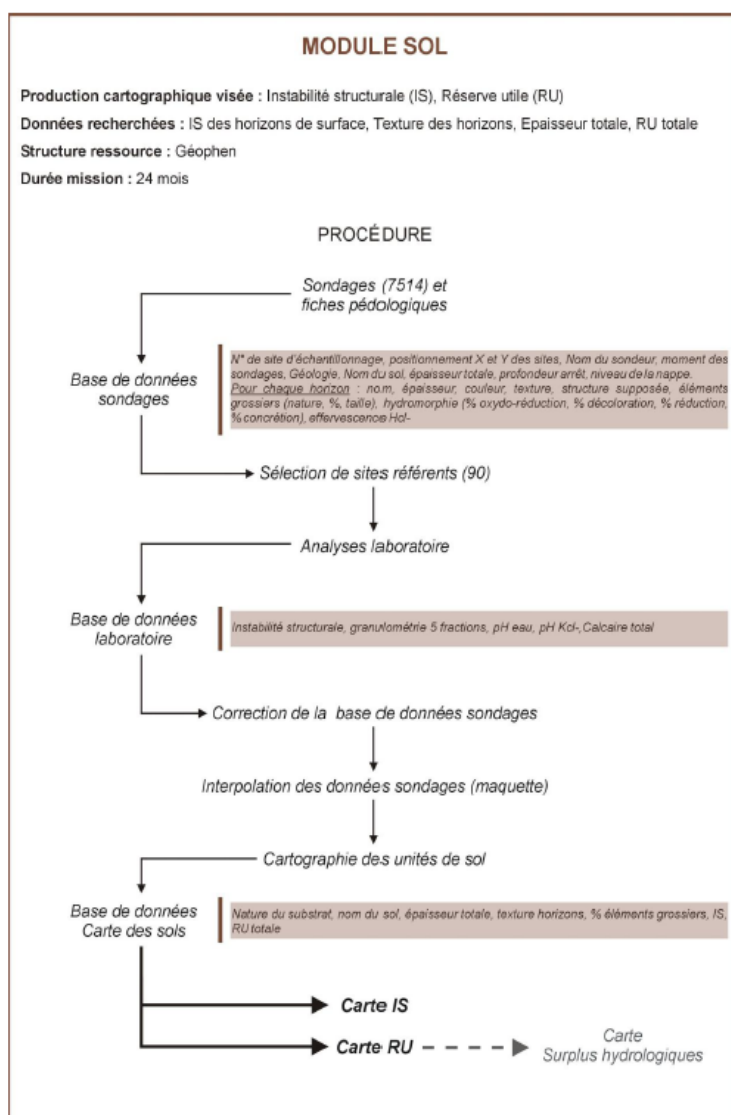


Figure 6 : synoptique du module Sol, P. Le Goué [3]

- Les pratiques agricoles

Le rôle des pratiques agricoles dans la modélisation de l'aléa érosion est déterminé à partir de 3 types de données d'entrée. Le premier concerne la présence pérenne du couvert végétal. Une première distinction est apportée entre les surfaces toujours végétalisées (prairie permanente, vergers) et les surfaces mises régulièrement en culture. Dans ce second cas, un deuxième type de données s'attache à préciser les types de rotations culturales : durée du cycle de rotation, et durée des périodes d'interculture.

Ainsi la durée moyenne des périodes d'interculture a été retenue pour définir les niveaux de pression érosifs imputables aux pratiques agricoles. Un troisième type de données est renseigné concernant les modalités de gestion des intercultures (sols nus, mise en place d'un couvert végétal provisoire etc...).

Les niveaux de pression érosifs moyens sont ainsi calculés pour les données d'entrée « durée des intercultures » et « gestion des intercultures ».

Aussi, en vue de déterminer ces deux paramètres, il a été nécessaire de créer une base de données départementales sur les pratiques agricoles. Ces deux paramètres ont été établis à l'échelle communale, à l'issue d'un traitement statistique mené au niveau du fichier général du RGA de 2000 qui a permis de définir une typologie des systèmes de production agricole qui a été attribué à chaque commune en fonction du plus grand nombre d'exploitations (4 types : les communes à profils d'exploitations céréalières dominantes, les communes à profils d'exploitations d'élevage dominants, les communes à profils d'exploitations laitières dominants et les communes à profils d'exploitations mixtes dominants). Une mise à jour de ces données a été réalisée sur la base d'un questionnaire pour tenir compte de l'évolution 2000 - 2007.

Les rotations culturales sont de 5 types : basées uniquement sur les cultures d'hiver, dominées par les cultures d'hiver, avec un équilibre entre cultures d'hiver et de printemps, dominées par les cultures de printemps, basées uniquement sur les cultures de printemps. La premier type correspond à la plus faible durée moyenne d'interculture (3 mois), le dernier à la plus long durée moyenne d'interculture (6 mois) (cette moyenne est calculée sur 4 années d'intercultures). Pour chaque commune enquêtée, relevant du même type d'exploitation agricole, un niveau de pression pondéré est affecté, en fonction des surfaces cultivées renvoyant à un même type d'interculture ; ce niveau est ensuite affecté à toutes les communes du même type d'exploitation agricole.

Cultures dans rotation type						Durée interculture (mois)					Niveaux de pression
A1	A2	A3	A4	A5	Approche saisonnière	I1	I2	I3	I4	Moy	
Blé	Orge	Colza	blé	Orge	Cultures hiv/cultures hiv	3	1	3	3	2,5	1
Blé	Colza	Blé	Pois	Blé	Cultures hiv/cultures print	1	3	6	3	3,3	2
Blé	Pois	Blé	orge	Colza	Cultures hiv/cultures print	6	3	3	1	3,3	2
Blé	Bett	Blé	Pois	Blé	Cult print/cult d'hiv	6	1	6	3	4,0	3
Blé	Maïs	Blé	Pois	Blé	Cult print/cult d'hiv	8	1	6	3	4,5	3
Blé	Maïs	Blé	Maïs	Blé	Cult print/cult d'hiv	8	1	8	1	4,5	3
Blé	Maïs	Blé	Pois	Blé	Cultures hiv/cultures print	8	1	6	3	4,5	3
Blé	Pdterre	Blé	Pois	Blé	Cult print/cult d'hiv	8	2	6	3	4,8	3
Blé	Maïs	Maïs	Blé	Maïs	Cult print/cult d'hiv	8	6	1	8	5,8	4
Maïs	Maïs	Maïs	Maïs	Maïs	Cultures print /cultures print	7	6	7	6	6,5	5

Tableau 7 : rotations culturales, durées d'interculture et niveaux de pression érosive, P. Le Goué et J.F. Colin [3]

Les différentes pratiques d'intercultures : couvert végétal couvrant, non couvrant, labour profond, labour superficiel et sol nu renvoient respectivement aux niveaux de pression 1 à 5. La démarche de pondération est la même que précédemment, elle aboutit à un même niveau de pression par système d'exploitation pour chaque commune enquêtée, niveau affectée à toutes les communes du même type.

- La topographie

Elle a été caractérisée par différentes classes de pentes. Elle a été réalisée sur la base du MNT du Calvados, élaboré par le Conseil Général du Calvados, au pas de 20 m. Les valeurs ont été regroupées en 6 classes : [0-1%] ; [1-2%] ; [2-5%] ; [5-10%] ; [10-15%] et >=15%.

- L'érosivité pluviale

Deux types de données ont été ici rentrées :

- le nombre de jours par an pendant lesquels l'intensité journalière des précipitations est supérieure à 10 mm. Les classes sont les suivantes : < 20 jours ; [20-25[; [25-32[; [32-40[; >=40. 22 postes pluviométriques ont été retenus, ainsi que 19 postes limitrophes : il s'agissait de disposer d'un nombre d'années significatif, mais aussi d'une bonne couverture départementale. Le réseau retenu couvre la période 1991-2004 ;
- la détermination des surplus hydrologiques (sans qu'il soit possible de déterminer ceux qui reviennent au drainage et au ruissellement). Ceux ci sont calculés à l'échelle mensuelle, puis cumulés à l'échelle annuelle (la détermination de la réserve utile des sols est réalisée via la cartographie des sols réalisées dans le Calvados). Concernant ces surplus hydrologiques, la classification régionale définie dans des travaux précédents a été reprise. Les classes retenues sont les suivantes : < 150 mm ; [150 - 250 mm[; [250 - 350 mm[; [350 - 450 mm[; >=450 mm. Il est à noter qu'au niveau du département, une seule valeur de l'ETP est disponible au niveau de la station de Caen-Carpiquet.

c) La démarche générale

La démarche générale, et son application à l'échelle de la parcelle PAC (l'échelle du rendu, et la définition des îlots d'intégration pour chacune des méthodologies sont décrites au chapitre suivant) sont synthétisées au niveau de la figure ci-dessous :

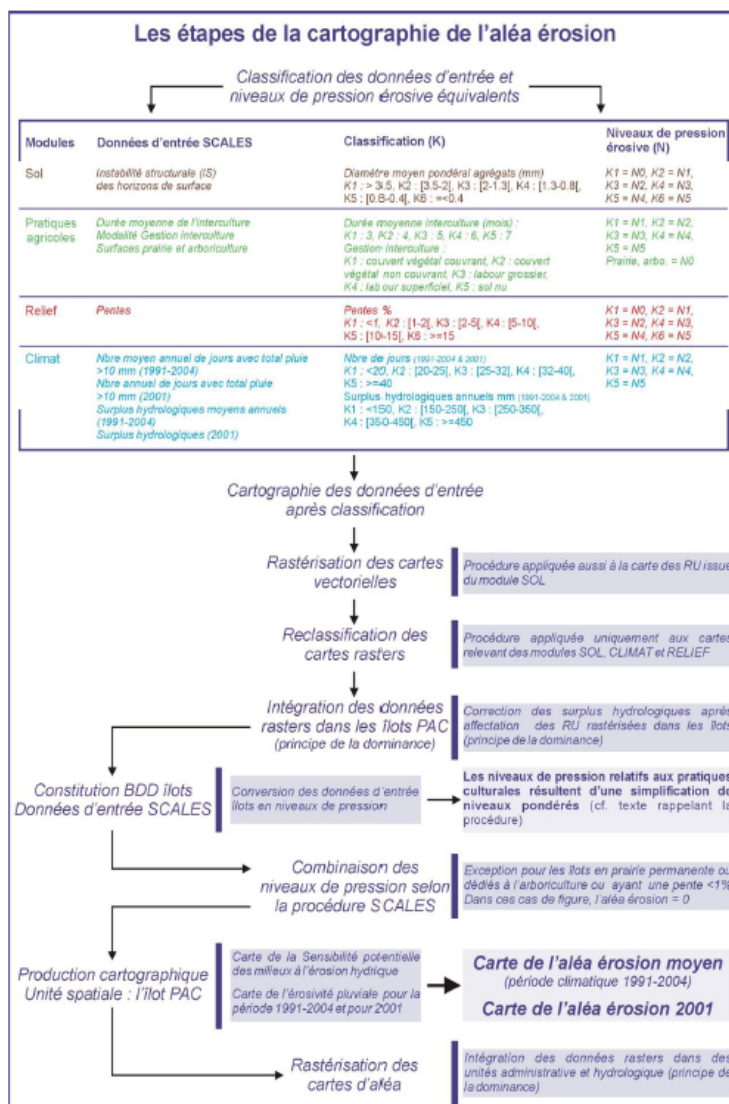


Figure 7 : vue synoptique sur l'enchaînement de toutes les étapes conduisant à la production de la carte aléa érosion des sols à l'échelle de l'îlot PAC. P. Le Goué [3]

1.4.- Les données disponibles, échelle du rendu et cartographie obtenue, et validation

1.4.1.- La méthodologie développée par la faculté universitaire des sciences agronomiques de Gembloux en vue de la qualification du risque ruissellement (S. Dautrebande et Ir. F. Colard, [1])

Cette méthodologie a été testée sur 3 sites pilotes : les bassins versants de La Blanche à Ath (1945 ha), du Focqueu à Dinant (979 ha) et de la Lasne à Lasne (4996 ha), soient des bassins versants de taille comprise entre 9 et 50 km². Nous ne disposons malheureusement pas d'un descriptif précis des ces 3 bassins versants et de leur spécificité ; les raisons de leur choix ne sont pas décrites au niveau de [1].

Les rendus cartographiques sont réalisés sur fond de carte IGN au 1/10 000. Il apparaît donc que l'échelle des rendus est relativement fine ; les seuils de surface drainée retenus pour la mise en évidence des talwegs (dès 1 ha) dans le cadre de la cartographie des risques de ruissellements concentrés sont ainsi compatibles avec la superficie des bassins versants cartographiés, et l'échelle du rendu.

Nous faisons figurer ci-dessous deux exemples de rendus cartographiques des zones à « risque de ruissellement diffus » et des zones à « risque de ruissellement et d'érosion concentrés », réalisés sur le bassin versant de la Lasne.

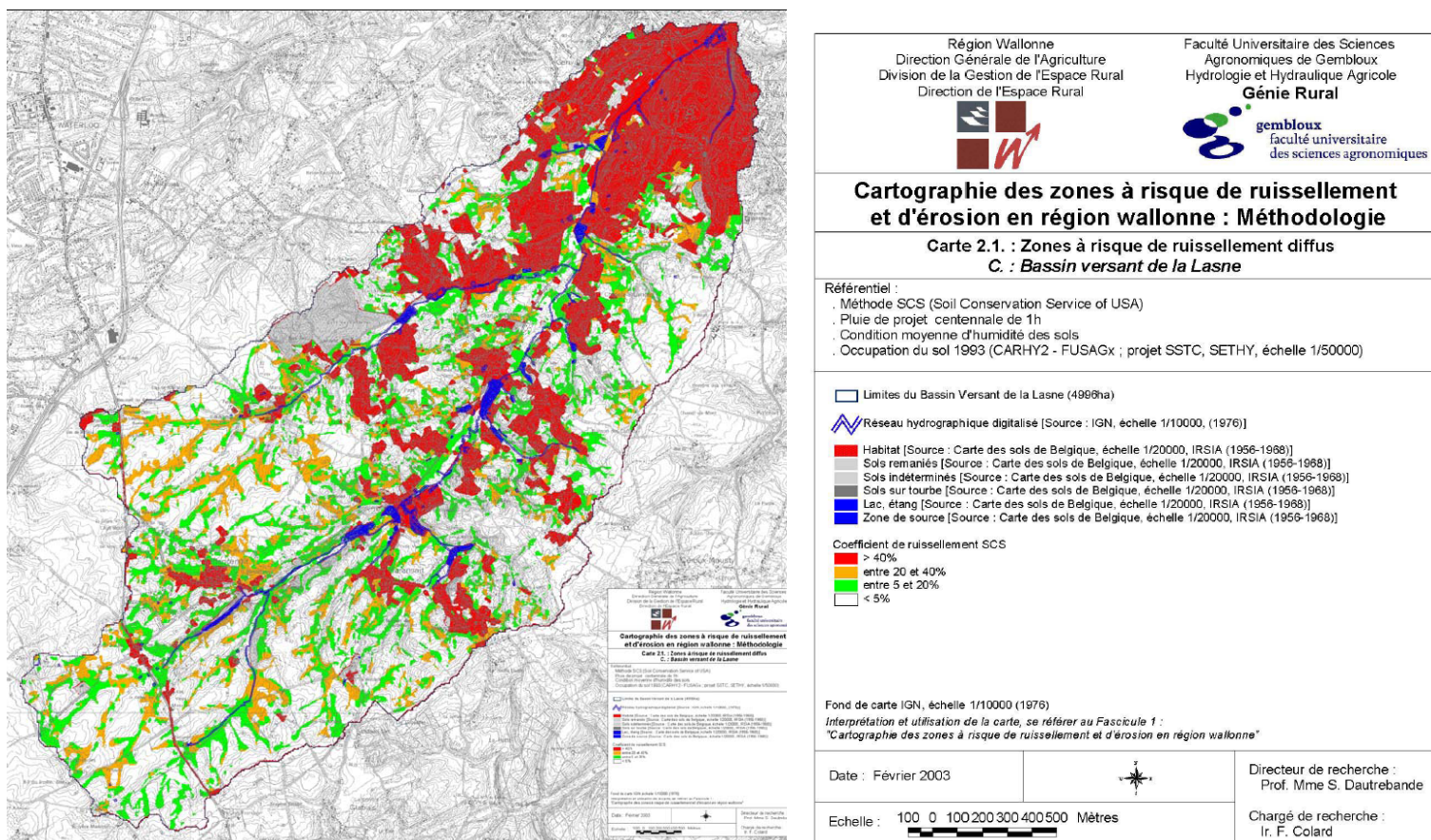


Figure 8 : cartographie du risque ruissellement diffus sur le bassin versant de la Lasne, et détail de la légende S. Dautrebande et Ir. F. Colard. [1]

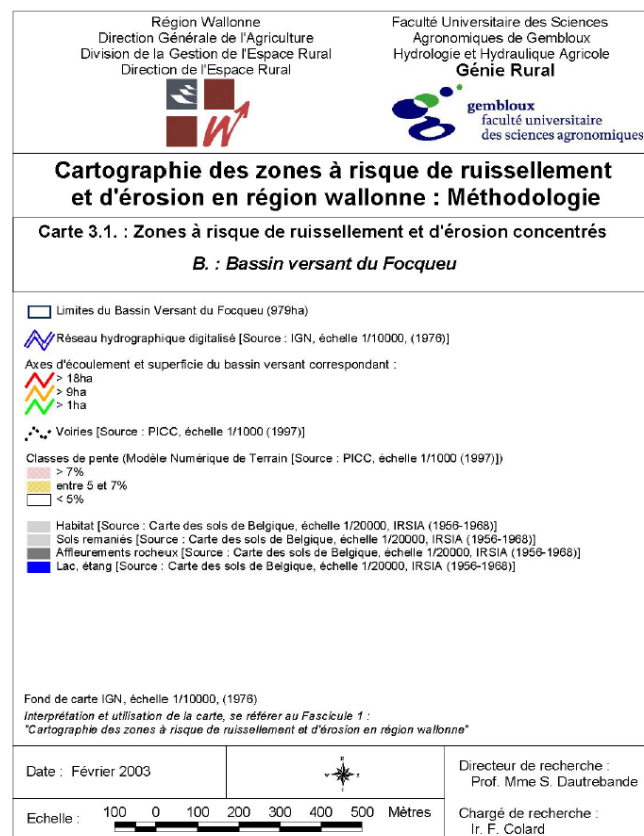
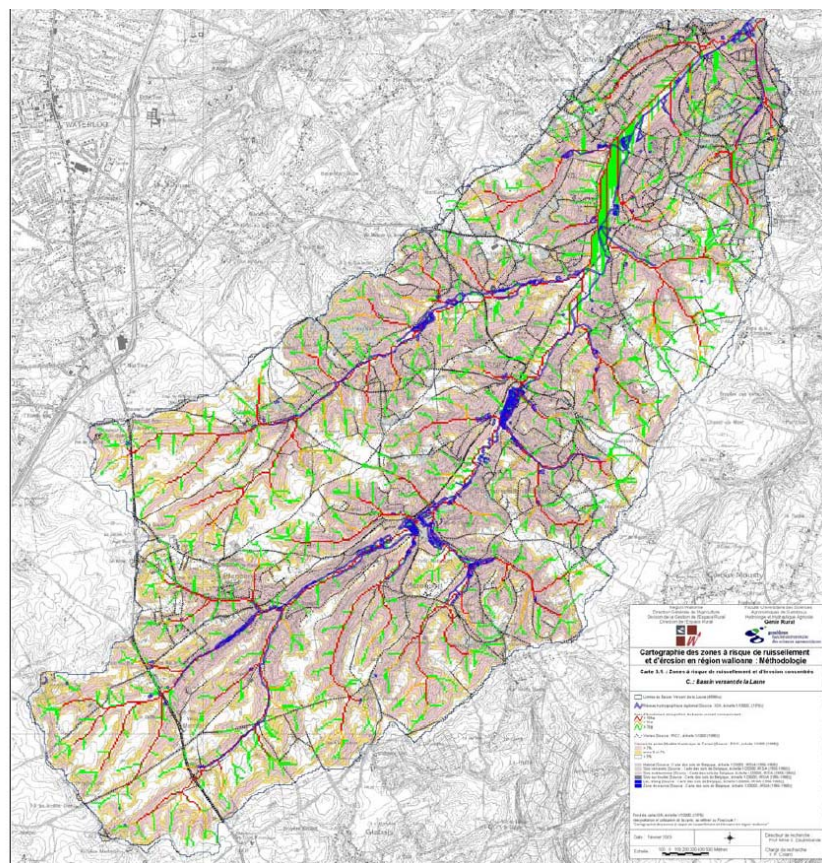


Figure 9 : cartographie du risque érosion et ruissellement concentrés sur le bassin versant de la Lasne, et détail de la légende S. Dautrebande et Ir. F. Colard. [1]

La précision d'un tel rendu dépend de la disponibilité effective des données. En région Wallonne, les données disponibles sont :

- pour la topographie : un MNT au 1/10 000 de l'IGN où figurent un semis de point hétérogène d'un point tous les 20 à 80 m. Ces points ont été complétés par des points de niveau terrain du PICC (Projet Informatique de Cartographie Continue au 1/1 000) issus d'une exploitation photogrammétrique de photographies aériennes, dont les données vectorielles ont une précision de 25 cm en x, y et z ;
- pour les données pédologiques, de cartes des sols au 1/20 000, disponibles sur l'ensemble du territoire belge ;
- pour les données d'occupation du sol, d'une information selon des mailles élémentaires de 30 x 30 m.

La validation de la méthode a été réalisée en parallèle à son élaboration, elle est succinctement décrite dans le rapport analysé : les désordres observés sur ces trois bassins versants pendant deux années (2001-2002) se situent au niveau des zones à risques effectivement déterminées via l'application de la méthodologie.

1.4.2.- La méthodologie INRA/BRGM (O. Cerdan, Y. Le Bissonnais et al.) [2]

La méthodologie développée à l'échelle nationale dans Érosion hydrique des sols en France, Y. Le Bissonnais, et al. INRA, IFEN [8], a fait l'objet d'une adaptation en vue d'aboutir au guide méthodologique pour un zonage départemental de l'érosion des sols développé en [2].

Au préalable à sa définition, deux études de sensibilité ont été respectivement menées sur l'Hérault [5], et l'Oise [6]. Elles analysent la sensibilité du zonage de l'aléa obtenu, au regard des différentes données d'entrée. En particulier, elles examinent, en vue d'appliquer la méthodologie nationale à une échelle départementale, l'intégration de données plus précises (MNT IGN à 50 m et cartes des sols au 1/250 000) et l'apport d'une approche plus dynamique où la carte des pentes serait pondérée soit par l'aire drainée, soit par l'aire drainée pondérée par l'occupation du sol (« aire ruisselante »).

Les conclusions de ces deux rapports sont synthétisées ci-dessous ([5] et [6]) :

- la résolution à 50 m du MNT IGN apparaît indispensable pour un transfert de la méthodologie nationale à la méthodologie départementale, en particulier pour le département de l'Hérault au relief contrasté, mais aussi pour l'Oise où l'utilisation de grandes mailles pour le MNT conduit à sous estimer largement le facteur pente. Le rapport [6] ne préconise pas l'utilisation de MNT d'une résolution supérieure compte tenu des résolutions des autres cartes d'entrée ;
- l'utilisation des cartes de sols au 1/250 000 est indispensable (l'utilisation d'une carte au 1/1 000 000 conduit à une surestimation du risque érosion sur plus de la moitié du département de l'Oise). ;
- à l'issue d'une étape de validation, les deux rapports concluent à l'intérêt d'utiliser une approche dynamique du facteur pente, intégrant la surface drainée, voire la surface drainée pondérée par l'occupation du sol, en particulier pour l'Hérault où elle permet d'intégrer une occupation du sol très contrastée (cf. figures ci-dessous) ;
- l'occupation du sol est un paramètre déterminant au niveau de la classification de l'aléa érosion dans le cadre de la méthodologie mise en œuvre : il est indispensable de disposer de couverture Corine Land Cover à jour (elle est mise à jour tous les 10 ans) ;
- la méthodologie développée pour le facteur climat est inadaptée aux régions méditerranéennes. Sur l'Hérault, elle aboutirait, en automne, à une seule classe à l'échelle départementale. Le facteur retenu a été finalement celui d'une pluie journalière de période de retour 2 ans, recodée en 5 classes. Sur l'Oise, deux méthodologies ont été testées : celle correspondant aux hauteurs pondérées par le facteur intensité (soit la méthode générale préconisée en [2]), l'autre aux hauteurs « pondérées par la méthode des périodes de retour ». C'est la première méthode qui s'avère la plus adaptée au regard de la validation menée.

Les étapes de validation ont reposé⁸ sur une validation par expertises locales sur l'Hérault, via l'envoi d'un questionnaire aux différents experts (chambres d'agriculture, pédologues de l'INRA...), puis à la localisation des écarts entre cette expertise et la carte érosion établie. Elle a conduit à intégrer le facteur pente pondérée par la surface drainée ruisselante, et le choix de la pluie journalière de période de retour 2 ans comme facteur climat (cf. ci-dessus). Pour l'Oise, l'évaluation réalisée s'est montrée « positive, dans le sens où les tendances mises en évidence par la cartographie n'ont pas été remises en cause ».

Le rapport [6] souligne cependant que si les calculs ont été effectués à la maille de 50 m, cela ne correspond pas à la résolution à laquelle il est souhaitable d'utiliser la carte. En effet, même si cette étude a démontré la robustesse de l'approche avec une sensibilité du modèle bien répartie entre les différents paramètres d'entrée, il n'en reste pas moins que la résolution des paramètres d'entrée limite l'utilisation des cartes, et ne permet pas d'identifier des zones plus petites que la centaine de km².

Nous présentons ci-dessous les figures suivantes :

⁸ Il est à noter que pour les deux départements l'analyse des arrêtés CATNAT s'est avérée non envisageable pour procéder à la validation des deux cartographies (la dénomination « coulées de boue » pouvant regrouper plusieurs catégories d'événements, les arrêtés étant aussi dépendant de l'existence de dommages : plus une zone est peuplée, plus la probabilité de faire l'objet d'un arrêté de CATNAT sera importante).

- la cartographie des pentes, des pentes pondérées, et des pentes pondérées par l'occupation du sol sur l'Hérault. Ces cartes révèlent pour l'Hérault une surface classée en zones 6 à 8 plus forte en intégrant le facteur surface drainée. Cette différence est atténuée en intégrant le facteur occupation du sol (cf. [5] p. 28) : le Haut Languedoc est en effet fortement boisé, et considéré à ce titre comme territoire « infiltrant » dans le logiciel STREAM, utilisé pour le calcul de cette surface pondérée (l'inverse est constaté dans les secteurs de vignobles) ;
- la carte de sensibilité à l'érosion et celle de l'aléa réalisées avec un maillage de 50 m x 50 m sur l'Oise. Ces cartes révèlent l'importance du facteur climat : la carte de sensibilité ne parvient pas à refléter les risques importants de l'Ouest du département et sous estime grandement l'érosion.

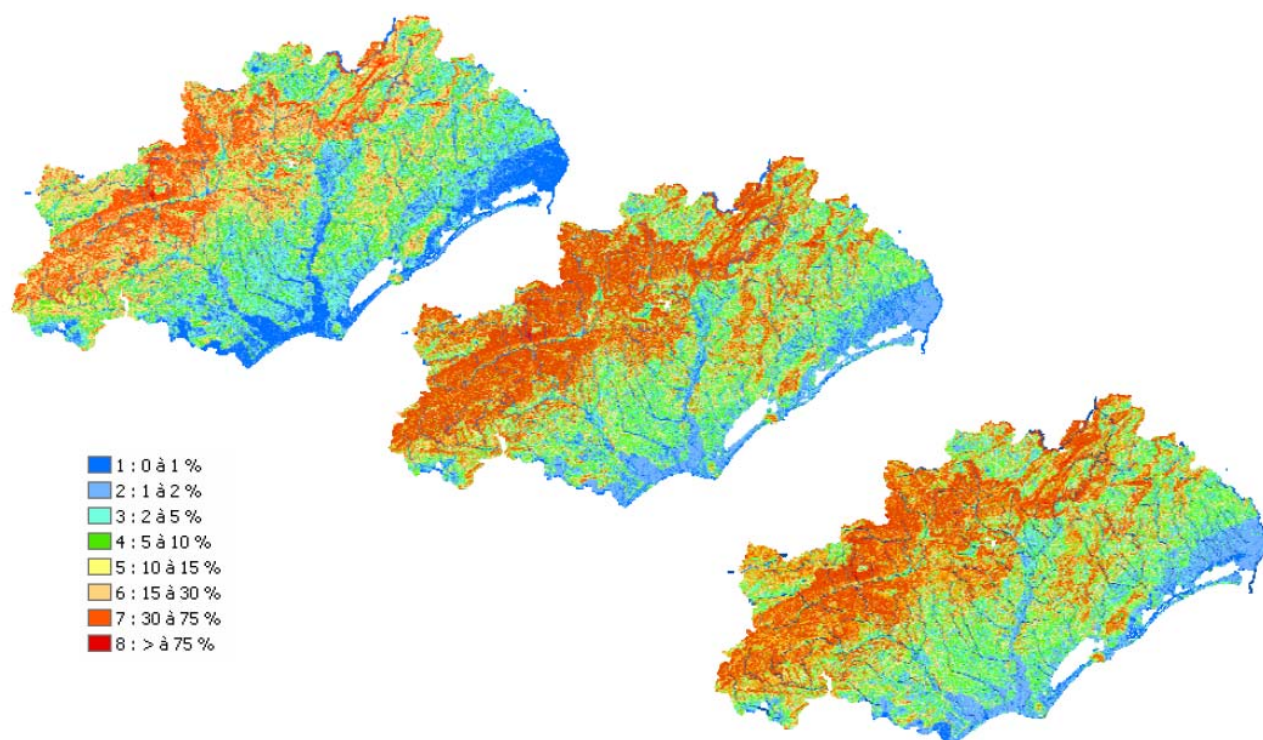


Figure 10 : carte des pentes (à gauche), pondérées par l'aire drainée (au milieu), par l'aire drainée ruisselante (à droite) sur le département de l'Hérault (J.F. Desprats, A. Bourguignon, O. Cerdan, Y. Le Bissonnais, A Colmar [5])

La pondération des pentes par l'aire drainée (ou drainée ruisselante) a été réalisée suivant le tableau ci-dessous.

Classes de pentes	Aire drainée / ou ruisselante		
	1 (< 1 ha)	2 (1 à 20 ha)	3 (> 20 ha)
1 (0 à 1 %)	1	2	3
2 (1 à 2 %)	2	3	4
3 (2 à 5 %)	3	4	5
4 (5 à 10 %)	4	5	6
5 (10 à 15 %)	5	6	7
6 (15 à 30 %)	6	7	7
7 (30 à 75 %)	7	7	7
8 (plus de 75 %)	8	8	8

Tableau 8 : pondération des pentes par l'aire drainée (ou drainée ruisselante), d'après [5], p. 27

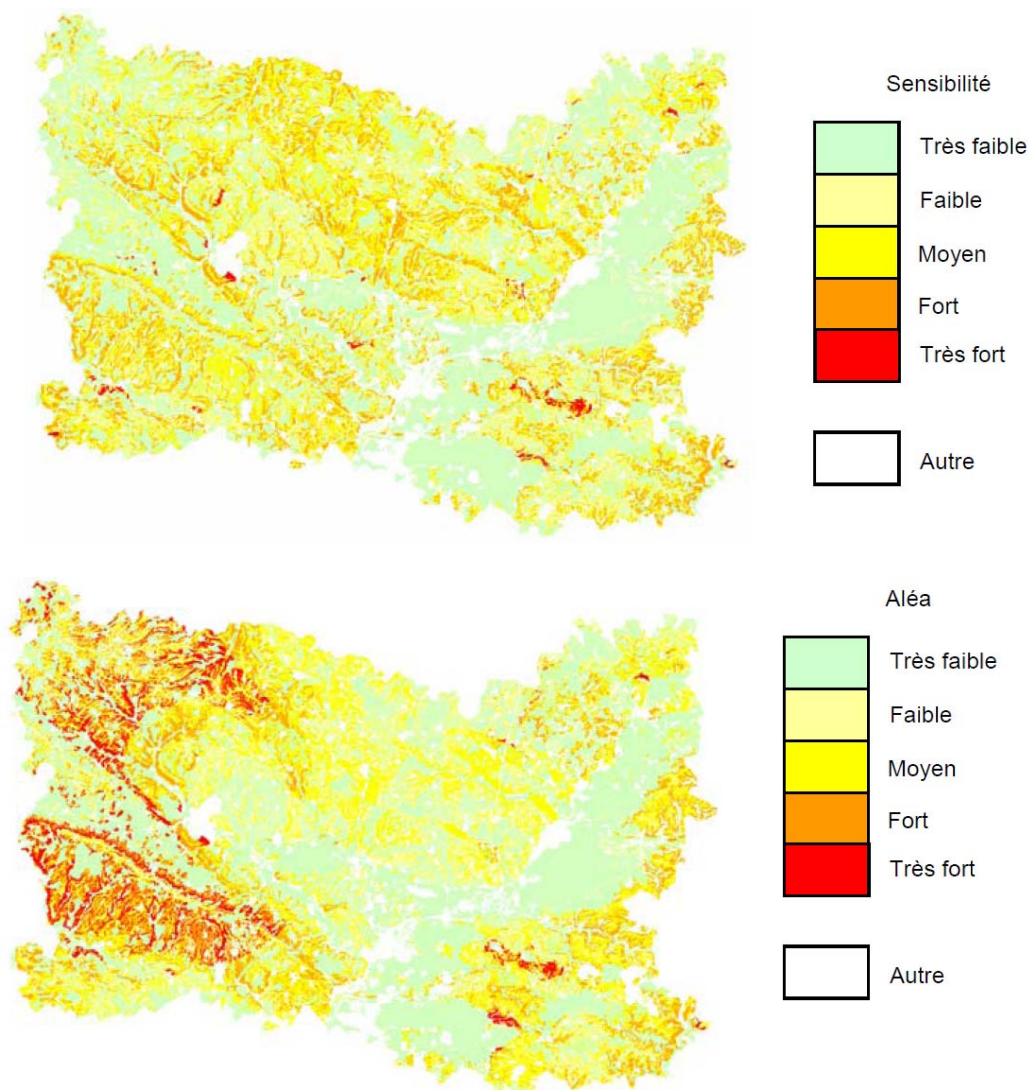


Figure 11 : cartes de la sensibilité à l'érosion (carte du dessus), et de l'aléa, sur la base d'un MNT 50 m x 50 m, sur le département de l'Oise, N. Surdyk, O.Cerdan, I.G. Dubus [6]

1.4.3.- Le modèle SCALES du laboratoire Geophen de l'université de Caen (P. Le Goué) [3]

Au niveau de la méthodologie développée par le laboratoire Geophen de l'université de Caen, c'est l'îlot PAC⁹ qui a été retenu comme base d'unité spatiale. Il regroupe le plus grand nombre de parcelles contiguës exploitées par un même agriculteur. Il est donc composé d'une ou de plusieurs parcelles ; il peut être défini par un ou plusieurs modes d'occupation du sol, et par une ou plusieurs pratiques agricoles. Les bases de données relatives au RPG (registre parcellaire graphique) sont centralisées par l'AUP (Agence Unique de Paiement). Une circulaire du MAP (11/12/2007) définit les modalités de diffusion de ces données.

⁹ qui découle de la réforme de la Politique Agricole Commune de 1992.

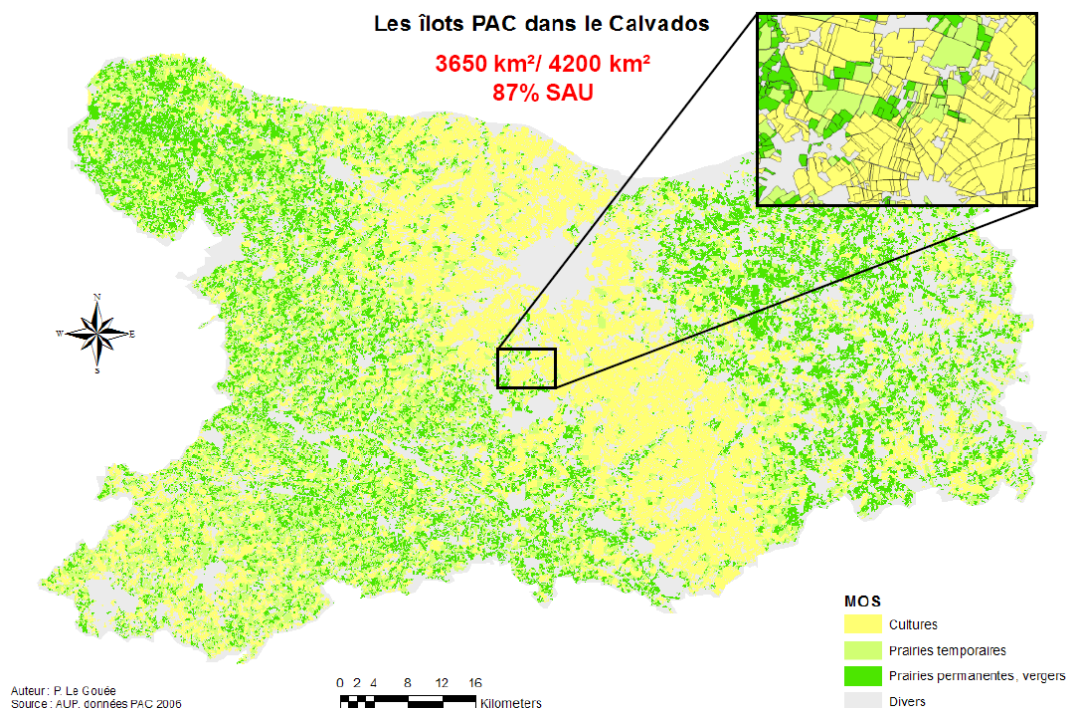


Figure 12 : les îlots PAC dans le Calvados. P. Le Goué [3]

En vue de caractériser les pratiques culturelles, il s'est avéré que l'utilisation de la base de données Corine Land Cover s'avérait insuffisante ([3], p. 22) :

- elle correspond à une utilisation au 1/100 000, « elle s'avère inadaptée pour la gestion locale d'espaces d'échelles plus précises (1/50 000 ou 1/25 000) (...) ». Si la base de données Corine Land Cover est effectivement disponible au pas de 20m (cf. méthodologie [2]), la surface de la plus petite unité cartographiée (seuil de description) est de 25 ha (500 m x 500 m) ;
- « la nomenclature des territoires agricoles ne permet pas de préciser la nature ou le type de culture. C'est le cas par exemple de l'item « terres arables hors périmètres d'irrigation » qui regroupe les céréales, les légumineuses de plein champ, les cultures fourragères, les plantes sarclées et les jachères. Il en va de même pour l'item « zones agricoles hétérogènes » qui regroupe des petites parcelles de cultures annuelles diversifiées, des prairies et/ou des cultures permanentes complexes ;
- la dynamique d'évolution aux échelles saisonnières ou pluriannuelles n'est pas envisageable dans la mesure où le renouvellement des bases de données a lieu tous les 10 ans. (...) »

Aussi, l'intégration des données du modèle SCALES dans les îlots PAC a nécessité d'affecter à chacun des îlots une seule information par type de données d'entrée. Chaque image est à la base une grille dont la maille élémentaire est de 20 m x 20 m (cf. MNT du Calvados disponible pour ce maillage). La rastérisation initiale conserve les classes telle qu'elles ont été définies ; une reclassification est ensuite effectuée sur le choix « de la dominance » (cf. figure ci-dessous pour la donnée pente), en vue d'affecter à chaque îlot PAC une seule donnée.

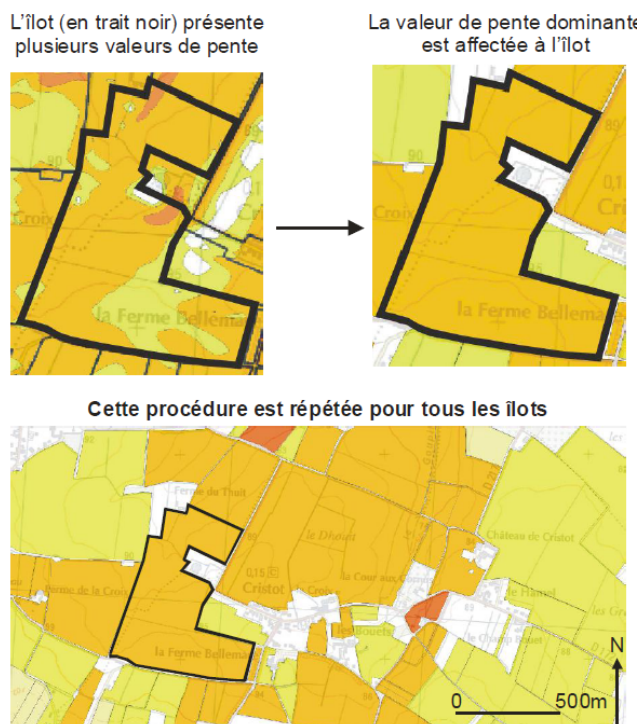


Figure 13 : procédure d'intégration des données dans les îlots suivant la procédure de la dominance, ici la donnée pente (P. Le Goué [3])

Comme on l'a vu, les données sol ont nécessité la construction d'une base de données exhaustive, d'échelle fine (1/50 000). Aussi, l'élaboration de la carte des sols s'est heurtée à la difficulté de définir les limites des différentes unités. C'est la limite nette qui a été retenue : elle s'identifie sur le terrain à une rupture topographique, à un changement des valeurs de pente, au passage d'une roche à une autre, plutôt qu'une limite floue intégrant des espaces de transition, qui se révèlent plus proche d'une réalité de terrain. Cette dernière méthode s'accommodait cependant mal à une intégration au modèle SCALES qui prévoit une qualification des sols à l'échelle de l'îlot PAC.

Enfin, P. Le Goué souligne que l'application des règles de pédo-transferts pour estimer l'instabilité structurale entraîne une surestimation de l'érodibilité. Il recommande fortement de procéder à la mesure de cette propriété du sol. Cela est d'autant plus important que cette donnée d'entrée tient une place prépondérante dans l'évaluation de l'aléa érosion, que ce soit avec le modèle SCALES ou avec d'autres comme celui de l'INRA (cf. figure ci-dessous). Cette incohérence est à mettre sur le compte de l'application, au niveau national des règles de pédo-transfert (cf. **Figure 2**).

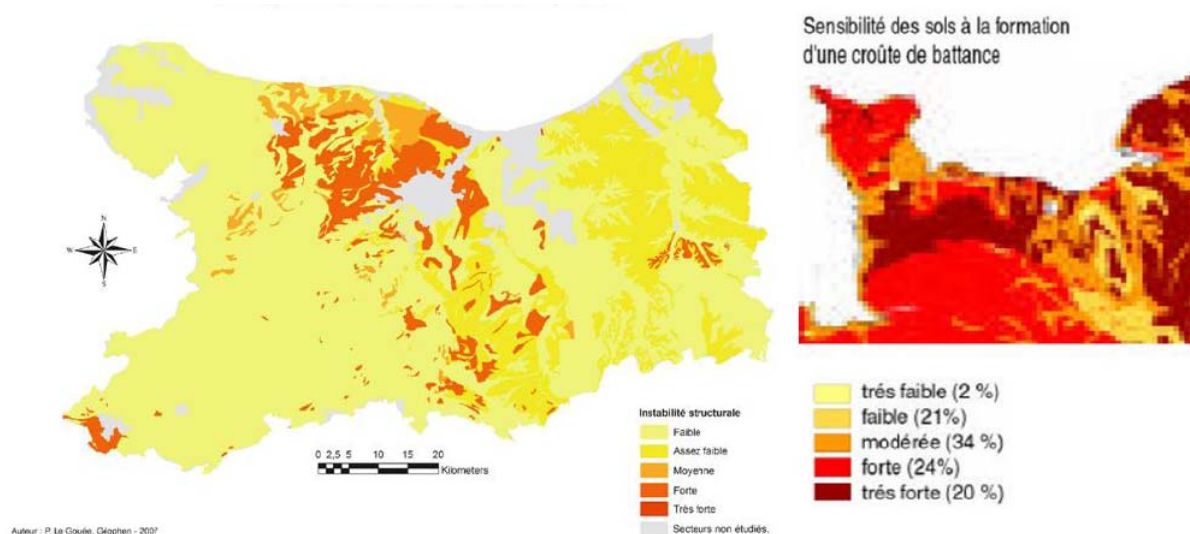


Figure 14 : comparaison de la carte de l'instabilité structurale des sols du Calvados avec la carte nationale issue de [8], P. Le Goué [3]

S'il est vrai que la comparaison est faite ici avec la carte nationale des sols au 1/ 1 000 000 dont les études de sensibilités [5] et [6] ont déconseillé l'utilisation dans le cadre de la méthodologie [3], il reste que la surévaluation de l'instabilité structurale est manifeste. L'étude de sensibilité menée sur le département de l'Oise [6] relative à l'influence de la carte des sols (passage du 1/ 1 000 000 au 1 / 250 000) ne révèle aucune différence de classe sur les critères battance et érodibilité pour 48,6% de la surface départementale, une augmentation d'une classe pour 10,5 %, et bien un abaissement d'une classe pour 21,2 %, et de deux classes pour 16,9 % de la surface départementale.

Tout comme la méthodologie de l'INRA / BRGM [3], le modèle SCALES aboutit à la définition d'une cartographie de la sensibilité potentielle des milieux à l'érosion des sols, puis à la définition d'un aléa moyen érosion des sols, une fois le croisement avec l'érosivité pluviale effectuée (ici le croisement a été réalisé avec l'érosivité en contexte climatique « normal » (1991-2004)).

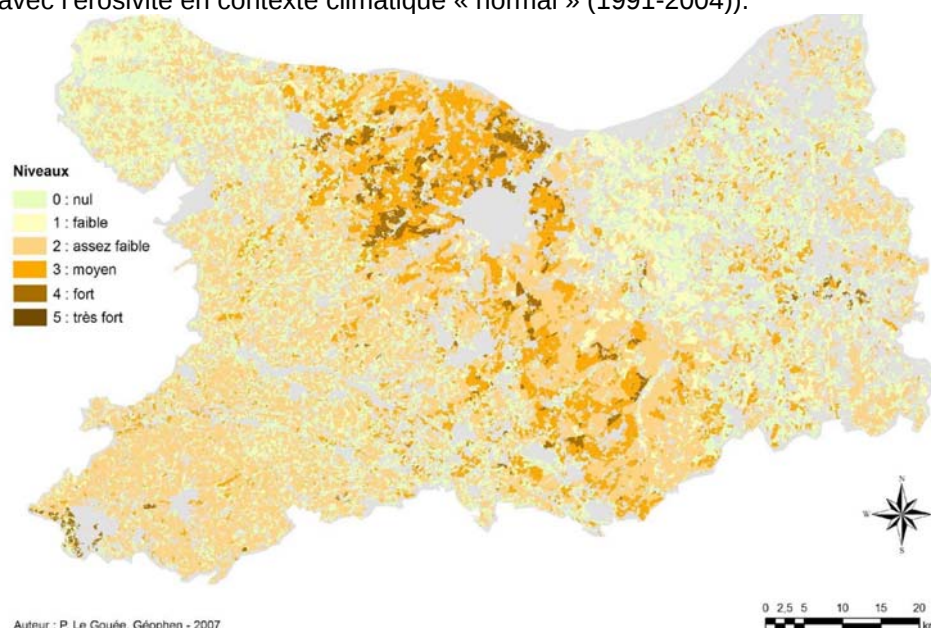


Figure 15 : la sensibilité potentielle des milieux à l'érosion dans le Calvados, à l'échelle de l'ilot PAC, P. Le Goué [3]

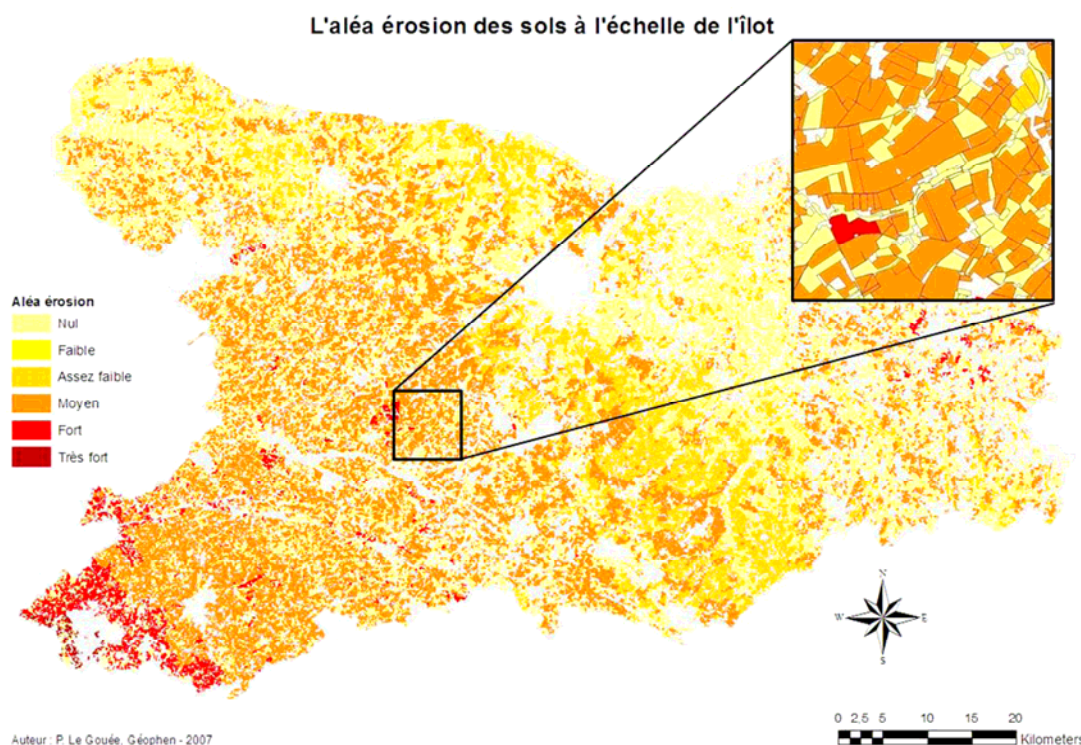


Figure 16 : l'aléa moyen « érosion des sols » dans le Calvados, à l'échelle de l'ilot PAC, P. Le Goué [3]

P. Le Goué souligne dans la conclusion de [3] la spécificité du modèle SCALES. S'il combine des procédures descriptives et quantitatives, qui le rapproche en cela des modèles semi-quantitatifs, il s'en distingue en s'affranchissant des règles de pédo-transferts nationales, et en introduisant des variables spécifiques comme celle des pratiques agricoles à travers leurs temporalités qui renvoient au concept d'utilisation du sol et non simplement d'occupation du sol. Enfin le modèle SCALES permet de déboucher sur l'idée que la gestion de la problématique érosion suppose prioritairement une approche à l'échelle de la parcelle agricole ou du groupe de parcelles (cf. îlot PAC).

P. Le Goué [3] fait part dans cette même conclusion de la difficulté d'une démarche de validation des résultats obtenus. Tenté via une comparaison avec les résultats d'autres modèles (INRA [8] et PESERA¹⁰), elle n'a pu aboutir, compte tenu des remarques précédentes (cf. règles de pédo-transferts), mais aussi de modèles destinés essentiellement à une approche comparative interrégionale. Seule une validation externe doit être tentée, basée sur un inventaire exhaustif des signes d'érosion dans des secteurs tests à niveau d'aléa différencié ; elle n'a pu encore être menée, et doit l'être dans un avenir proche.

1.5.- Première synthèse relative à la fonction de production liée au ruissellement par refus d'infiltration (hortonien)

Si l'on met à part la cartographie du risque ruissellement concentré décrite au niveau de la méthodologie développée par l'université de Gembloux [1], qui aborde déjà ainsi la fonction de transfert que l'on examinera au chapitre suivant, les 3 méthodologies décrites précédemment aboutissent à une cartographie de l'érosion potentielle, à différentes échelles, qu'un croisement avec l'aléa climatique (ou l'érosivité pluviale) vient transformer en aléa érosion.

Cette cartographie de la fonction de production correspond à :

- une cartographie des *Curve Number* puis des coefficients de ruissellement en 3 classes pour la méthodologie wallonne [1], à une échelle relativement fine, pour un rendu au 1/10 000 (pas de 30 m x 30 m). Ces coefficients de ruissellements résultent du croisement des *Curve Number* avec un aléa climatique ; ils intègrent en conséquence une variation du coefficient de ruissellement en fonction de l'aléa pluviométrique. Les valeurs des *Curve Number* dépendent elles-mêmes d'un classement hydrologique des sols, de la pente des terres, et d'un classement hydrologique de l'occupation du sol. Il convient d'examiner dans quelle mesure cette méthodologie est effectivement adaptable en France à l'échelle départementale. On trouve ainsi une formulation de base des *Curve Number* dans [17] (J.J. Grill et B. Duvous, 1991) qui cherchait à examiner les conditions d'adaptation des méthodes américaines¹¹. On pourra se rapprocher aussi de la méthodologie mise en œuvre en Pays de Caux, dont on trouve dans [15] (*Martin et al.*) une méthodologie d'évaluation ;
- une sensibilité à l'érosion qui se traduit dans la méthodologie INRA/BRGM [2] par le croisement des données d'occupation du sol, de la battance, de la pente et de l'érodibilité. Dans le cadre d'une cartographie de la fonction de production liée au ruissellement, il nous semble que cette méthodologie pourrait conduire à la définition d'une « production potentielle » dont la définition en classes reposerait sur le croisement des données occupations du sol de la base de données Corine Land Cover, pente et battance (l'érodibilité étant essentiellement liée à la résistance au cisaillement des sols, et à leur capacité à être mobilisé par le ruissellement). On a vu aussi les réserves que P. le Goué dans [3] évoquait à propos de l'application de règles de pédo-transferts nationales à l'échelle départementale, qui servent au calcul des classes de battance ;
- le modèle SCALES est le plus complexe des 3 modèles étudiés. Son architecture, développée au niveau de la **Figure 3** fait intervenir les pratiques agricoles, à travers la gestion et la durée des intercultures, l'inclinaison des pentes, et l'instabilité structurale en vue de la définition d'une sensibilité

¹⁰ Pan-European Soil Erosion Risk Assessment

¹¹ une formulation davantage destinée à l'hydrologie urbaine existe aussi dans la Technical Release 55 du NRCS [18].

potentielle des sols à l'érosion. Il nous semble que sa méthodologie peut être appliquée en vue de la classification d'une « production potentielle » au ruissellement, dans la mesure où le critère stabilité structurale (**Tableau 6**) lie directement le risque d'érosion diffuse au ruissellement¹² : l'instabilité et la battance apparaissent liées. Ce modèle inclut aussi une variabilité de cette production potentielle au climat, puisque l'aléa finalement défini résulte du croisement avec l'érosivité pluviale dont la détermination passe, entre autres, par la définition de la réserve utile des sols, ce qui fait l'originalité de ce modèle.

C'est au niveau du chapitre 3, et à l'issue de l'examen des retours d'expériences [14] et [16], que nous évoquerons plus précisément à quel stade d'une méthodologie générale de cartographie du risque ruissellement, il sera possible d'intégrer une fonction de production.

2.- Dynamique à l'échelle du bassin versant

Nous avons abordé au chapitre 1, la cartographie de la fonction de production du ruissellement, à travers la comparaison de 3 méthodologies destinées à la cartographie de l'aléa érosion. Les cartographies obtenues au niveau des méthodologies [2], [3] se déclinent essentiellement sous la forme d'une cartographie de l'érosion potentielle (ou la sensibilité à l'érosion), dont on a vu l'adaptabilité à un calcul de la production potentielle au ruissellement. Un croisement avec l'aléa climatique permet enfin d'intégrer la variabilité saisonnière de cette production potentielle.

Dans cette seconde partie, on abordera l'aspect dynamique, puis de concentration du ruissellement. A savoir, comment de l'aptitude potentielle des sols au ruissellement, on passe à sa combinaison puis à sa concentration, vers et dans le réseau hydrographique. On sera aussi amené à élargir le champ de la production potentielle au ruissellement, par refus d'infiltration (ruissellement hortonien), objet essentiel de la première partie, en abordant la dynamique de versant (nappe de versant, ruissellement de subsurface, et aires contributives saturées).

Le premier chapitre évoquera la dynamique de versant à travers la méthodologie mise en œuvre par Daniel Delahaye au niveau de l'université de Caen dans [3] qui aborde celle du ruissellement supercifical, et la théorie des aires contributives saturées et donc du ruissellement de subsurface et de la nappe de versant, telle qu'elle a pu être mise en application à travers le logiciel TOPOMODEL. Nous passons ici de l'échelle de la centaine d'hectares (1 km²) (chapitre 1), à la dizaine de km² (bassins versants élémentaires).

L'université de Gembloux au niveau de la définition du risque d'érosion concentrée évoquait une méthodologie d'approche que nous avons évoquée au chapitre 1.3.1.. Nous proposons dans un second temps d'examiner plus précisément cette méthodologie, voire quels développements pourraient être mis en œuvre à l'échelle du bassin versant en vue d'intégrer la fonction de production, et d'aboutir à une classification des talwegs recensés (développement d'indices).

¹² en introduction nous évoquons que le développement d'une croûte peut au contraire réduire la quantité de particules mobilisables. Cependant, elle a tendance à augmenter aussi le ruissellement (diminution de l'infiltration), et donc la possibilité d'une érosion par ce même ruissellement diffus : c'est ce lien qui est retenu ici.

2.1.- Dynamique à l'échelle du bassin versant élémentaire (une dizaine de km²)

2.1.1.- Dynamique spatiale du ruissellement hortonien

Nous évoquons dans cette partie la méthodologie mise en œuvre par Daniel Delahaye du laboratoire Geophen de l'université de Caen ; elle constitue la deuxième partie de [3], intitulée dynamique spatiale du ruissellement érosif.

La méthodologie proposée permet de définir le pourcentage de surfaces directement, indirectement ou non connectées à l'échelle d'un bassin versant.

Aussi une base de données par bassin versant a été constituée. Elle regroupe :

- Le réseau de haies. Dans [3], Daniel Delahaye définit le rôle hydrologique des haies en fonction de :

- . la position de la haie par rapport à la pente (perpendiculaire/oblique/parallèle) ;
- . la présence ou l'absence d'un talus, d'une ripisylve ;
- . la position au sein du versant (interfluve/haut versant/versant/talweg ;
- . la pente générale du versant (0 à 2, 2 à 5, 5 à 10, > 10 %) ;
- . le type de parcelles situées à l'amont et à l'aval de la haie (prairie/labour/bâti) ;
- . la végétation qui compose la haie (densité haute/moyenne/basse).

Cette classification aboutit à la définition de 4 classes (faible, moyen, fort et très fort), liées au rôle hydrologique des haies.

- Les fossés. Deux critères sont retenus : orientation par rapport à la pente et connexion ou déconnexion au cours d'eau.
- Le réseau routier. Trois types de morphologie peuvent être distingués : route en déblai (encaissée), remblai (surélevée par rapport au versant), insérée dans le versant. Dans la base de données, le réseau routier est caractérisé par deux critères : l'orientation de la route par rapport à la pente générale du versant, et le recoupement ou non d'un talweg pouvant permettre la connexion avec un cours d'eau.
- Les entrées de champ. Elles révèlent une importance particulière en milieu bocager, dans la mesure où elles forment une entaille dans les haies et talus, dont le rôle peut être réduit à néant si elles sont mal positionnées.
- L'occupation du sol. Il s'agit essentiellement du positionnement des herbages sur les versants, qui permet de connaître celles susceptibles de bénéficier du rôle de filtre exercé par les prairies. Ce rôle de ré-infiltration est très réduit si les écoulements sont déjà concentrés. Il faut donc tenir compte à la fois de la dissémination des blocs de prairie et du positionnement des prairies. Les prairies situées à l'aval de versant n'auront aussi qu'un rôle tampon réduit.

La méthodologie proposée a été appliquée à 4 bassins versants de petite taille de 10 à 20 km² (bassins versants du Bordel, du Bactot, du Tortillon et de Venduvre).

Elle permet d'aboutir à une répartition des surfaces (parcelles) non connectées, indirectement ou directement connectées au cours d'eau. Ce niveau de connexion dépend en particulier du réseau de haies, des coupures existantes (entrées de champ), et du réseau de drainage (fossés et talwegs), précédemment défini.

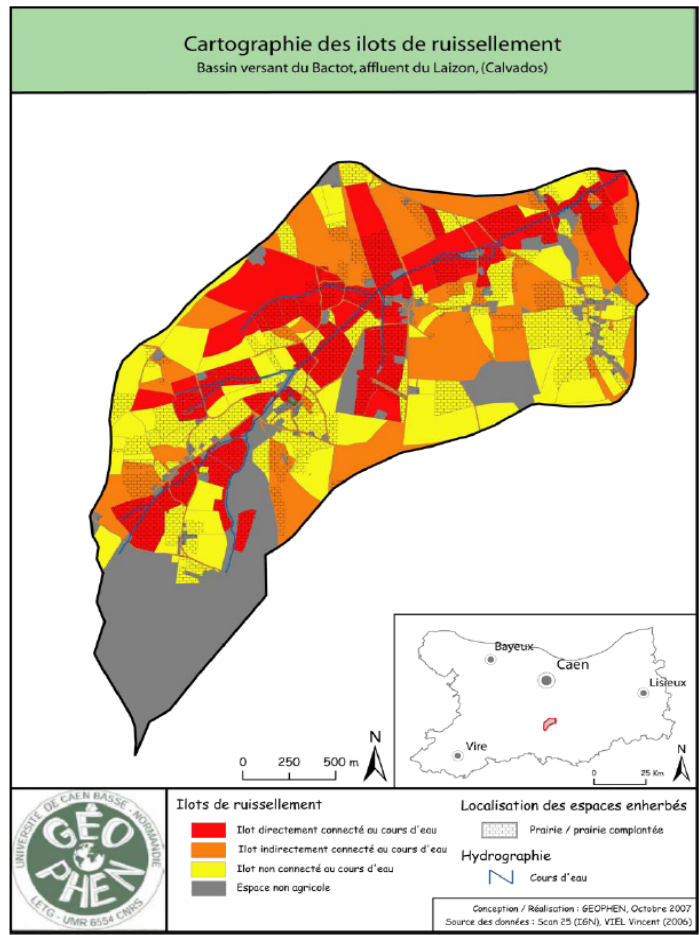


Figure 17 : bassin versant du Bactot, affluent du Laizon, cartographie des îlots de ruissellement ; D. Delahaye [3]

Le positionnement des herbages a été réalisé sur chacun des bassins versants concernés. Ce qui permet de déterminer le pourcentage de surface pour lesquels une réinfiltration n'est pas possible.

On aboutit ainsi pour chaque bassin versant, à définir (D. Delahaye [3]) :

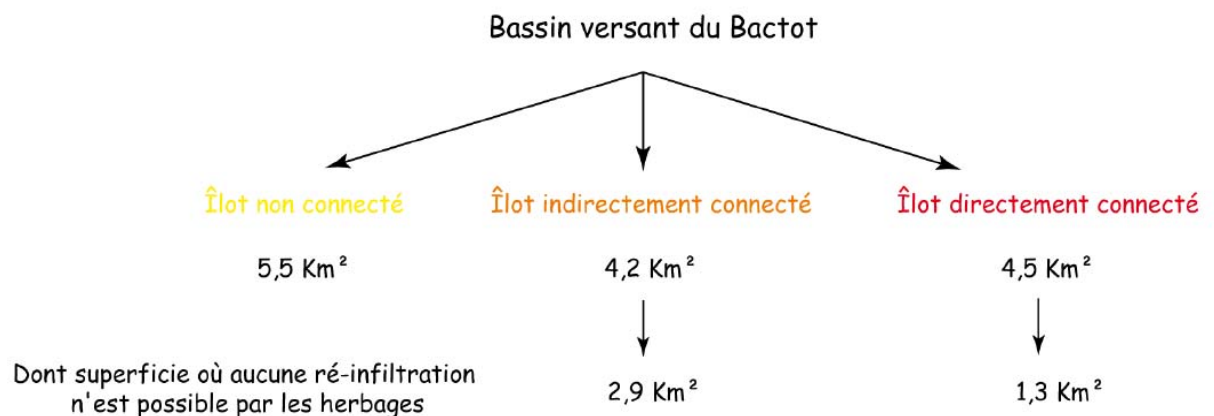


Figure 18 : répartition des surfaces suivant les types de connexions au niveau du bassin versant du Bactot, D. Delahaye [3]

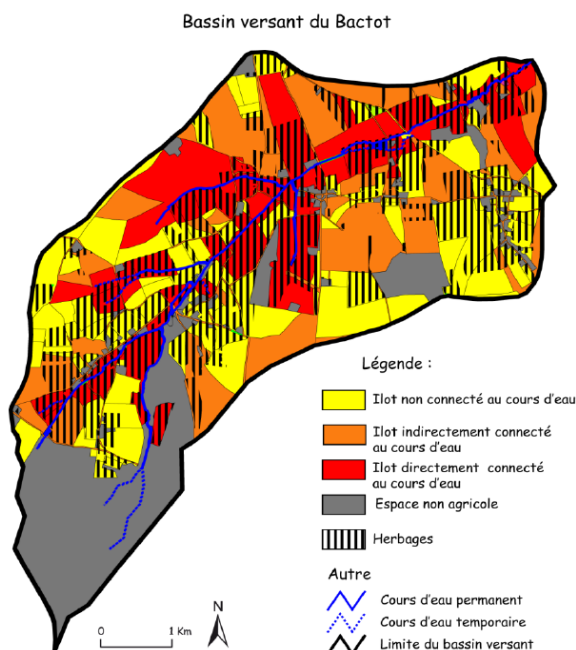


Figure 19 : bassin versant du Bactot, affluent du Laizon, organisation des herbages au sein des îlots de ruissellement, D. Delahaye [3]

Au final, un croisement avec l'aléa érosion issu du modèle SCALES est proposé. Deux possibilités d'intégration de la dynamique potentielle du ruissellement sont proposées :

- la première consiste simplement à superposer les deux informations. L'utilisateur peut alors à la fois juger de la sensibilité « statique » et « dynamique » de l'îlot. Elle permet d'éviter une perte d'information ;
- l'autre consiste à laisser la même classe, si l'espace n'est pas connecté, à l'augmenter d'une classe, s'il est indirectement connecté, et de 2 classes, s'il est directement connecté.

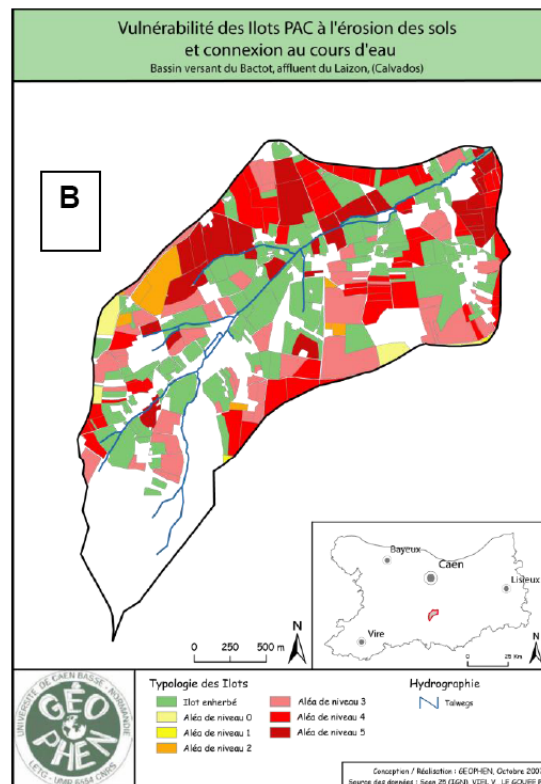
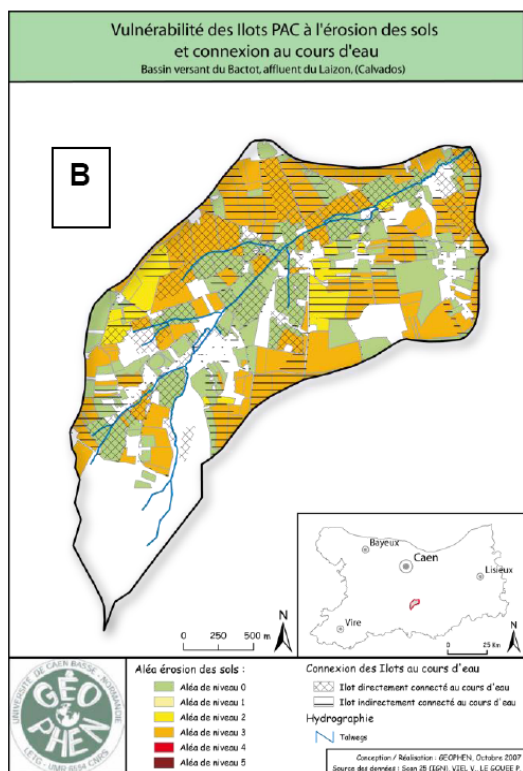


Figure 20 : bassin versant du Bactot, affluent du Laizon, vulnérabilité des îlots PAC et connexions au cours d'eau, D. Delahaye, deux possibilités d'intégration [3]

2.1.2.- Une autre dynamique à l'échelle du versant : celle mise en évidence à travers un fonctionnement du type aires contributives saturées

L'aptitude du sol à générer un ruissellement de surface n'est pas la seule variable explicative d'une fonction de production à l'échelle d'un bassin versant. « Dans certaines conditions géologiques, topographiques et géomorphologiques, la nappe peut être proche de la surface, et l'état de la réserve hydrologique se marquer directement dans le paysage sous la forme de zones humides dont l'extension est variable. Aussi sur ces bassins versants, le ruissellement est produit par la totalité de la pluie tombant sur une zone imperméable ou saturée, dont l'étendue varie avec le niveau moyen de la nappe phréatique : ce n'est plus une partie des précipitations sur toute la surface du bassin, comme dans la théorie de Horton, mais toute la précipitation sur une partie du bassin qui génère le ruissellement. » (cf. [11]). Cette théorie des aires contributives saturées a été mise en application via l'outil TOPMODEL dont nous allons effectuer ci-dessous une brève synthèse sur la base de [10], en essayant de voir dans quelle mesure, il serait susceptible de générer une cartographie de ces aires à l'échelle du bassin versant.

a) Principes de fonctionnement de TOPMODEL

Nous nous appuyons ici sur l'article de C. Obled et I. Zin, TOPMODEL : principes de fonctionnement et application, publié dans la Houille Blanche (janvier 2004), [10].

C. Obled et I. Zin précisent que dans TOPMODEL, la génération du ruissellement va se faire sur les surfaces contributives (ou temporairement) saturées, qui dépendent essentiellement de la topographie. « Deux composantes essentielles vont constituer le débit calculé à l'exutoire d'un bassin versant :

- d'une part une composante « lente » qui fait que la pluie infiltrée transite par le sol, dans les couches les plus conductives, souvent proches de la surface. En général ce flux « hypodermique » va suinter d'abord dans les berges, au voisinage de la rivière. Durant l'événement, il apparaîtra au niveau des zones contributives qui se développent dans le versant pour constituer le débit d'exfiltration de la nappe de versant ;
- d'autre part un ruissellement « rapide » apparaît généré par la pluie qui tombe sur ces surfaces temporairement saturées : cette saturation est provoquée par la remontée de la nappe, qui gonfle sous l'effet des volumes infiltrés, en affleurant à la surface du sol dans les endroits propices. Cette exfiltration interdit toute infiltration supplémentaire de la pluie qui ruisselle sans avoir transité par le sol ».

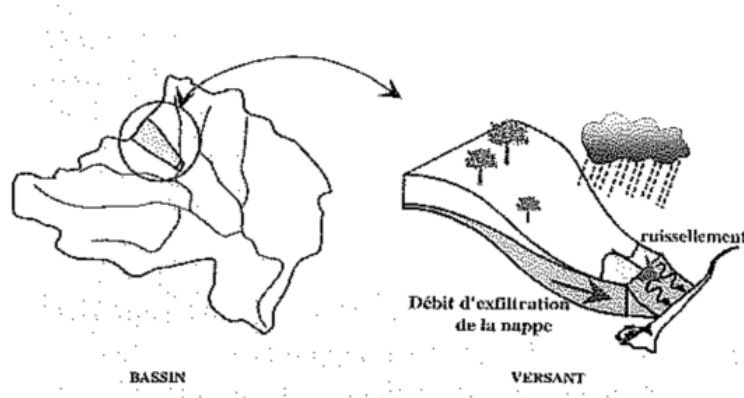


Figure 21 : mécanismes de génération des débits développés dans TOPMODEL, d'après K.J. Beven (1997), cité par C. Obled et I. Zin [10]

Aussi dans l'écoulement de la nappe de versant, la formulation initiale de TOPMODEL considère d'abord un tube de courant pris entre deux lignes de plus grande pente, et qui s'écoule à travers une section qui lui est orthogonale : un tronçon de ligne de niveau. Au droit de celle-ci, on considère la tranche de sol que le flux de nappe va devoir traverser. En pratique courante de modélisation, la plus petite entité de bassin sur laquelle seront effectués les calculs correspondra à une maille carrée issue d'un MNT, pixel i au niveau duquel un bilan hydrologique sera effectué avec une hypothèse de stationnarité. Très sommairement résumé, à chaque pas de temps, on calculera la lame d'eau entrante issu du bassin situé à l'amont du pixel. Elle correspondra à la lame d'eau en sortie fonction de la transmissivité du profil de sol et de la pente de la nappe du sol, assimilée à celle de la surface du sol

au droit de chaque pixel. On aboutit au calcul d'un déficit local du pixel i au pas de temps t , qui correspond à la profondeur locale entre la nappe et le sol (sans tenir compte de la porosité du sol), déficit qui sert au calcul de la transmissivité du profil de sol de chaque pixel (via un profil exponentiel de la conductivité du sol, qui décroît avec sa profondeur).

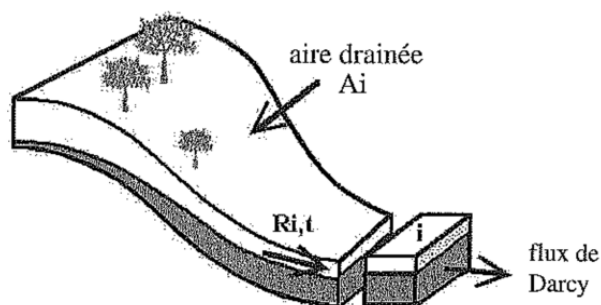


Figure 22 : hypothèse de stationnarité : équilibre d'un pixel, d'après K.J. Beven (1997), cité par C. Obled et I. Zin [10]

b) Vers la définition d'un indice d'engorgement

Aussi, ce bilan aboutit à introduire la notion d'indice topographique λ_i , qui nous intéresse plus particulièrement car il dépend uniquement de la topographie, et est donc facilement calculable.

$$\lambda_i = \ln \left(\frac{a_i}{tg\beta_i} \right), \text{ avec } a_i \text{ surface drainée au droit de chaque pixel } i, \text{ et } tg\beta_i, \text{ la pente locale de chaque pixel } i.$$

Comme le soulignent C. Obled et I. Zin dans [10], cet indice topographique λ_i correspond à un indice d'engorgement, qui traduit la propension d'un pixel à se saturer plus ou moins facilement :

- a_i caractérise la capacité du pixel i à collecter l'eau en amont ;
- tandis que la pente locale $tg\beta_i$, traduit sa facilité à l'évacuer vers l'aval.

Nous verrons dans les chapitres suivants dans quelle mesure cet indice nous paraît utilisable, sans doute de façon « dévoyée » puisque ici il est lié à la fonction de production, dans le cadre d'une cartographie du risque ruissellement.

2.2.- Dynamique à l'échelle du bassin versant (au delà d'une dizaine de km²)

2.2.1.- Ruissellement concentré : détermination des espaces de concentration

Les talwegs représentent les espaces de concentration du ruissellement. Une cartographie des zones à risque en terme de ruissellement passera donc en premier lieu par leur recensement.

Cette détermination, sur la base du MNT disponible, peut passer par l'exploitation d'outil de modélisation hydrologique intégré au logiciels SIG existants (cf. module Grid d'Arc Info). Il repose sur la détermination d'une surface drainée « seuil » de détermination. Ainsi, la méthodologie Wallonne [1] passe par la détermination des seuils de superficies suivants > 1 ha ; > 9 ha ; > 18ha.

Ces seuils dépendent non seulement de la surface des bassins versants que l'on souhaite cartographier, mais aussi du seuil de résolution du MNT disponible.

Aussi, en vue d'intégrer l'aspect « production » dont nous avons examiné au chapitre 1 trois méthodologies distinctes de détermination, la surface drainée, seuil de détermination des talwegs, pourrait être pondérée par un facteur de production propre à ces surfaces : le seuil de détermination serait ainsi augmenté pour des surfaces potentiellement ruisselantes, ou au contraire, diminué pour des surfaces « infiltrantes ». A ce titre, la méthodologie utilisée dans [5] et [6] (issuée de l'utilisation du modèle STREAM) en vue du calcul d'une pente pondérée par l'aire drainée « ruisselante », dont on a vu une illustration au niveau de la **Figure 10**, pourrait être riche d'enseignements.

2.2.2.- Vers une classification des talwegs

a) indice morphométrique

Au droit de chaque pixel du talweg mis en évidence, il est possible de déterminer le bassin versant drainé et ses caractéristiques : surface, périmètre, plus long parcours de l'eau etc..., et donc d'introduire un indice caractérisant la forme du bassin versant, élément déterminant dans sa réponse hydrologique.

Pour mémoire, cet indice de forme correspond classiquement à l'indice de Gravelius, indice sans

dimension $K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$, avec P périmètre du bassin versant, et A surface du bassin. La valeur

minimale de K_G ($K_G = 1$) correspond à un disque, soit la forme la plus ramassée d'un bassin versant. Cependant comme l'ont montré H. Bendjoudi et P. Huber dans [19], cet indice est fortement dépendant de la valeur du périmètre et donc du niveau de « résolution » retenu en vue de sa détermination. Si une classification de chaque « pixel » du talweg est retenu en se basant sur l'indice de forme de Gravelius, il conviendra d'y associer des classes dépendant du niveau de résolution du MNT utilisé.

Aussi, il nous paraît intéressant d'évoquer ici la démarche menée par J. Douvinet, D. Delahaye et P. Langlois dans [20] en terme de recherche d'un indice d'efficacité morphologique. Les auteurs proposent d'introduire un indice morphométrique IE (pour Indice d'Efficacité), indice qu'il est possible de calculer au droit de chaque pixel d'un talweg :

$$IE = \frac{L_{\max}}{\sqrt{A}} \times 100 \quad \text{avec } L_{\max}, \text{ longueur maximale de cellules équidistantes de l'exutoire (cf. figure ci-dessous, au niveau de laquelle } L_{\max} \text{ est appelée } Q_{\max})$$

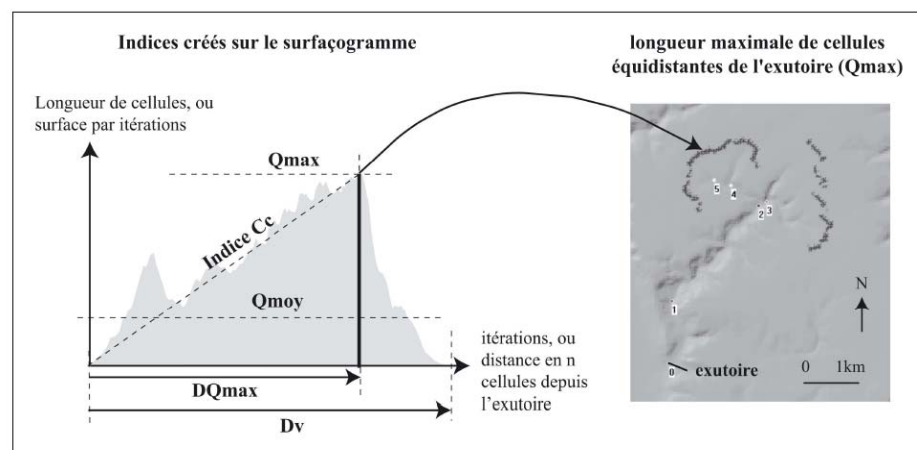


Figure 23 : indice créé à partir du surfacogramme produit par RuiCells, J. Douvinet, et al. [20]

$L_{\max}$ correspond au nombre maximal de cellules équidistantes de l'exutoire. En fonction de la résolution du MNT, cette longueur correspond donc à $n \times T$ (avec T (m) la taille de chaque maille). Comme évoqué précédemment pour l'indice de Gravelius, les plages de cet indice sont donc aussi directement dépendantes de la résolution (taille des mailles) du MNT. Cependant sur la base d'un même MNT, il permet une hiérarchisation morphologique des bassins versants étudiés.

Une application sur 3 bassins versants de Seine-Maritime est présentée dans [20] (figure ci-dessous). Les auteurs concluent que si cet indice « comme tout indicateur n'a pas forcément de réalité physique puisqu'il trahit avant tout une caractéristique de l'objet d'étude (Gaucherel, 2003)¹³ », il localise « de façon assez surprenante sur le bassin de St Martin exactement la même zone que celle qui a été touchée par des écoulements violents lors d'une crue rapide ».

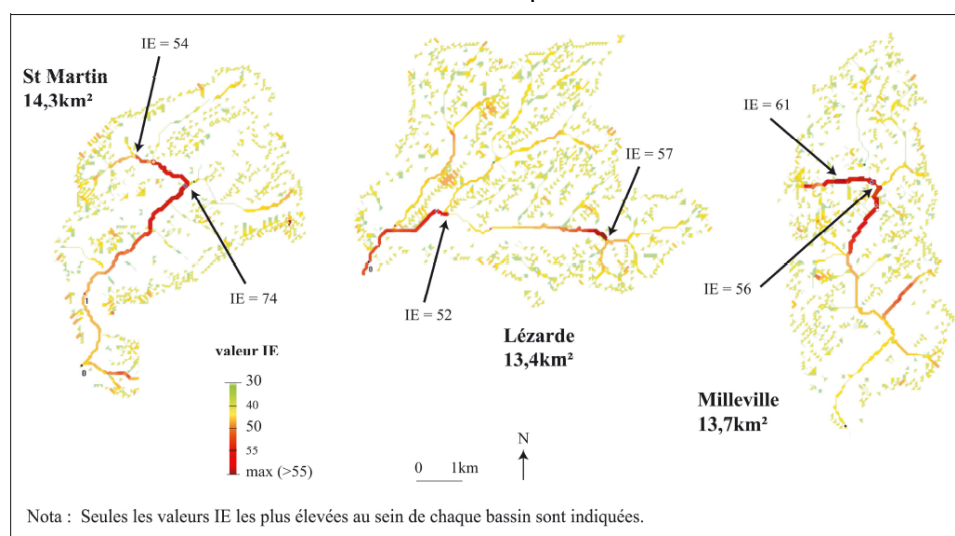


Figure 24 : cartographie de l'indice IE pour 3 bassins versants, J. Douvinet, et al. [20]

b) vers une utilisation dévoyée de l'indice topographique issu de TOPMODEL

Nous reprenons ici l'indice topographique issu de TOPMODEL. Cet indice dont on a vu qu'il pouvait s'apparenter à un indice d'engorgement, à savoir le rapport entre la capacité d'évacuation du « pixel », assimilée à sa pente, et la surface drainée.

Dans le cadre du logiciel TOPOMODEL, cet indice vise essentiellement à qualifier le niveau de saturation potentielle d'un « pixel » et son aptitude à générer du ruissellement : nous sommes encore ici dans la fonction de production.

Comme on le verra au dernier chapitre de ce rapport, qui tente de proposer une méthodologie générale (et de complexité progressive) d'évaluation du risque « ruissellement », cet indice pourrait être utilisé dans le cadre spécifique de l'évaluation du risque dans les secteurs de ruptures de pentes en pied de coteau, secteurs dont notre expérience et la bibliographie (notamment Martine Guiton dans [21]) montrent qu'il s'agit de zones potentiellement à risque.

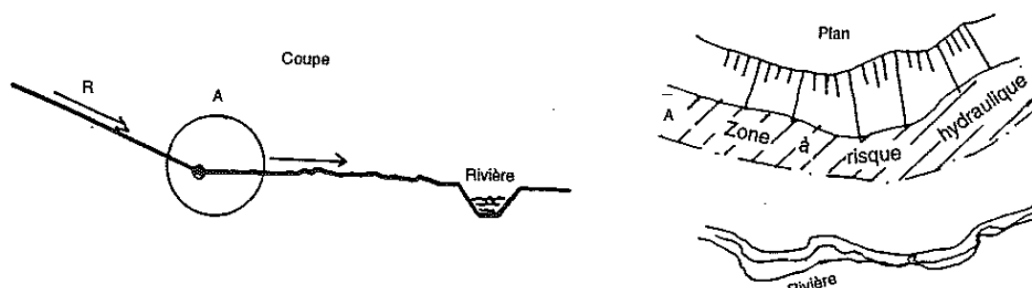


Figure 25 : les zones sensibles au ruissellement les ruptures de pente, M. Guiton [21]

¹³ C. Gaucherel. Pertinence de la notion d'indicateur pour la caractérisation du bassin versant, Espace Géographique vol. 3, 2003. pp. 265-281.

Or précisément dans [10], C. Obled et I. Zin en montrant les spécificités de calcul de cet indice dans le cadre de TOPMODEL, montrent comment les concepteurs du modèle ont été conduits à introduire le calcul d'une aire drainée spécifique pour chaque pixel de « rivière » ne prenant en compte que des pixels provenant latéralement et non de l'amont de la rivière.

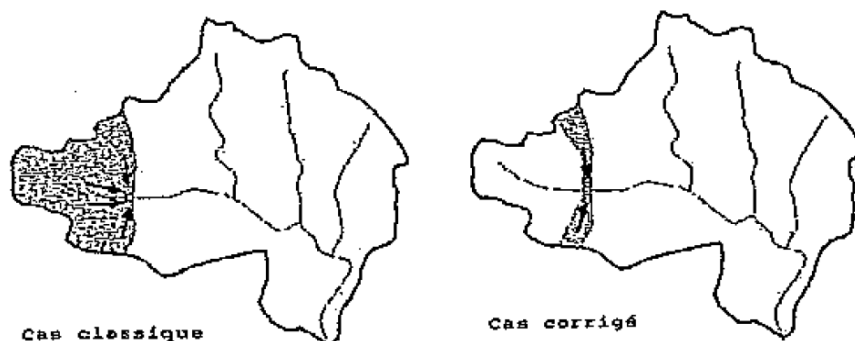


Figure 26 : calcul de l'aire drainée d'un pixel « rivière » dans le cas classique et corrigé, Saulnier, cité dans C. Obled et I. Zin [10]

Aussi, il nous paraît envisageable moyennant la sélection des seuls pixels d'un talweg situés en amont d'une confluence (pour les talwegs de premier ordre), de pouvoir calculer pour chacun d'entre eux une aire drainée (voire productive en l'association à une fonction de production), puis de calculer spécifiquement un indice topographique propre à chacun d'entre eux, et d'obtenir ainsi une classification des talwegs de premier ordre au niveau de ces zones sensibles, sur l'ensemble de la zone cartographiée.

Aussi indépendamment de l'aire drainée productive, si l'on cherche à sectoriser les ruptures de pente en aval des talwegs de premier ordre, il est alors possible d'étudier la variation de l'indice topographique d'un pixel n à un pixel $n+1$, sur ce même talweg, qui ne dépend plus que de la variation de pente (dans la mesure où la surface drainée est quasi la même). Cela revient à calculer un nouvel indice (« variation de pente ») :

$$\lambda_n - \lambda_{n-1} = \ln \left(\frac{I_{n-1}}{I_n} \right)$$

dont la valeur nulle équivaudrait à une non variation de pente, une valeur négative à une diminution etc... Une valeur négative de l'indice précédent, associée à un indice topographique élevé¹⁴ conduirait ainsi à mettre en évidence des secteurs potentiellement à risque.

3.- Éléments de synthèse en vue d'une cartographie du risque ruissellement

A l'issue de l'examen des méthodologies précédentes, nous tentons ici de présenter une synthèse des éléments qui nous paraissent déterminants en vue d'une cartographie départementale du « risque » ruissellement.

Nous proposons en introduction d'évoquer deux expériences qui nous paraissent riches d'enseignements en terme d'échelle de mise en œuvre d'une méthodologie, et de prise en compte de l'aléa climatique.

¹⁴ Nos retours d'expérience ont montré que le critère variation de pente n'est pas un facteur exclusif de sectorisation du risque ruissellement, cf. en particulier le bassin versant de Levet dans le Cher [14].

3.1.- Quelques éléments issus des retours d'expérience menés par le L.R.P.C. de Blois de 2002 à 2004 en région Centre, relatifs à des événements intenses estivaux

Sur la base d'une enquête de terrain réalisée à la suite d'événements pluviométriques ayant généré d'importants phénomènes de ruissellement, le L.R.P.C. de Blois a tenté de 2001 et 2004, en région Centre, de mieux appréhender la fonction de production relative à ces différents événements [14]. Le recensement des événements en question a été réalisé via une analyse des coupures de presse sur la période 2001-2004.

5 sites ont fait l'objet d'une analyse reposant sur la reconstitution du débit de pointe ruisselé via un recueil des laisses de crues suite aux événements, et de la fonction de production (tentative de détermination des coefficients de ruissellement correspondant, via l'application de la formule rationnelle et la reconstitution des événements pluviométriques (intensité et durée)). L'ensemble des événements analysés ont eu lieu en été : juin 2003 (commune de St Martin-d'Auxigny (18)), juillet 2004 (Levet (18) et Verdigny (18)), mai 2004 (St Amant Montrond (18)), juin 2004 (Montargis (45)).

A l'issue de l'analyse de ces 5 bassins versants, nous avons pu souligner [14] :

- **la faible taille des bassins versants étudiés** (de 14 à 55 ha), tous de taille inférieure à 1 km². Une méthodologie destinée à mettre en évidence de tels phénomènes imposera donc un pas de résolution relativement fin dans l'espoir de les mettre en évidence ;
- que l'ensemble des événements étudiés correspondaient à des événements pluviométriques estivaux, relativement intenses (68 à 105 mm/h sur la durée de l'événement). D'origine convective pour certains d'entre eux, ils apparaissent aussi d'une répartition relativement aléatoire, et non liée au relief. C'est particulièrement le cas pour le bassin versant étudié à Levet (18) situé dans une zone de plaine (la pente moyenne du bassin versant suivant le plus long parcours de l'eau est de 0,8%), où un événement d'une intensité de 96 mm/h en 30 mn est intervenu ;
- au niveau des bassins versants étudiés, et pour ces événements intenses estivaux, le faible rôle joué par la couverture des sols : qu'ils soient nus ou couverts de bois, de cultures ou de prairies, les éléments déterminants semblent davantage avoir été la pente, la texture du sol et son niveau de saturation (lié aux événements pluviométriques s'étant produit quelques jours avant), la nature du substrat, et le mode cultural. Une fonction de production ne pourra faire abstraction de ces données dans sa définition, et se limiter à la seule couverture ;
- les désordres survenus semblent le plus souvent liés à un non prise en compte du risque ruissellement, soit l'absence d'exutoire, déviation des axes d'écoulement, obstacles etc... : soit liés à « la capacité d'un secteur donné à évacuer le ruissellement produit » (cf. l'utilisation « dévoyée » de l'indice topographique évoquée en 2.2.2. b)).

3.2.- Typologie des événements pluviométriques à l'origine des phénomènes de ruissellement dans le pays de Caux, l'exemple du bassin versant de la Lézarde en pays Cauchois, et l'expérience acquise par la CODAH

Nous relatons ici l'expérience acquise sur le bassin versant de la Lézarde (213 km²) par la Communauté d'Agglomération du Havre (CODAH) qui regroupe 17 communes, Maître d'ouvrage des aménagements de lutte contre les inondations sur son territoire depuis 2004.

Ce bassin versant est particulièrement concerné par le risque ruissellement, comme en témoigne la liste des événements recensés par Emmanuel Hauchard de la CODAH dans [16] : 27 événements pour la seule période 1992 - 2003.



Figure 27 : le bassin versant de la Lézarde (213 km²), E. Hauchard [16]

Emmanuel Hauchard dans [16] souligne que ce qui fait l'originalité des événements catastrophiques du pays de Caux est directement lié au fonctionnement du système érosif. En effet, si les inondations qui affectent la région sont parfois liées à des débordements de rivière ou des remontées de nappes, elles correspondent surtout à des écoulements turbides qui sont justement la conséquence du croisement entre l'apparition du ruissellement au niveau des bassins versants élémentaires et de l'emboîtement hiérarchique des grands bassins produisant des écoulements hortonien. C'est bien ce transfert d'échelle qui conduit du ruissellement à l'inondation. Ces écoulements turbides qui submergent notamment les vallons secs sont « des manifestations rapides souvent violentes et de fonctionnement atypique pour le nord de la France, présentant beaucoup de similitude avec celui « des crues cévenoles » rencontrées en domaine méditerranéen ».

Il indique que ce phénomène conduisant à des inondations catastrophiques n'a cessé de croître dans le Pays de Caux. Par exemple entre 1983 et 1998, on dénombre 1083 déclarations de catastrophes naturelles en Seine Maritime liées à des inondations, touchant 484 communes sur les 745 que compte le département. Depuis le début des années 90, ce phénomène s'accélère avec 55 communes touchées en 1992, 149 en juin 1993, 14 en octobre 1993, 162 en décembre 1993, 283 en janvier 1995 et 55 communes en juin 1997. Cette aggravation est liée aux transformations du système agraire et des pratiques culturelles d'une part, et par l'extension des surfaces urbanisées d'autre part, qui, par le biais du fonctionnement du système érosif provoquent un transfert d'aléa climatique vers une exposition croissante au risque. ».



Montivilliers, le 26 décembre 1999 - le ruissellement issu du bassin versant de la Curande « passe » la barre d'habitations (rue F. Faure à Montivilliers)



Montivilliers - arrivée de l'onde de crue sur la voie SNCF, le 26 décembre 1999 et aujourd'hui

Figure 28 : l'événement du 26 décembre 1999 à Montivilliers (76), E. Hauchard [16] (sur la photo du haut les habitations sont situées dans l'axe du talweg du bassin versant de la Curande dont le ruissellement est théoriquement capté par le réseau eaux pluviales. Nous sommes ici à l'aval du bassin versant, le talweg rejoignant le lit de la Lézarde au niveau de la photo du bas)

Aussi Emmanuel Hauchard distingue deux types de catastrophes affectant le plateau cachois.

« Si l'on observe la liste des inondations « catastrophiques » survenues depuis 1992 évoquées précédemment, celles-ci ont toutes lieu soit en décembre-janvier (plus une en octobre), soit en juin. Il existe deux fenêtres temporelles propices à l'apparition de ces phénomènes critiques. **Les catastrophes d'hiver** surviennent après de longues séquences pluvieuses d'automne, alors que les travaux de récoltes ont laissé de nombreux sols à nu et compactés très sensibles à la battance. On a donc la conjonction de pratiques culturales à risque et du moment où les précipitations sont les plus abondantes de l'année.

F. Papy et C. Douyer (1988) ont clairement établi le fait que les écoulements turbides qui apparaissent en hiver ne sont pas liés à l'intensité des précipitations, qui sont plutôt faibles, mais davantage aux quantités tombées. Aussi des hauteurs précipitées « seuil » ont même été établies en vue de « déclencher » ce type de phénomène sur le bassin versant de la Lézarde :

- la pluie de la décade précédant la catastrophe doit être supérieure à 90 mm ;
- la pluie du jour précédant la catastrophe doit être supérieure à 15 mm.

Ce processus catastrophique de type hivernal correspond à la mise en fonctionnement de la totalité des surfaces cultivées au sein du système érosif, seules les parcelles où les chaumes subsistent contribuent de façon moins importante à l'augmentation du ruissellement. Les flux qui conduisent à ces inondations de fin d'automne et de début d'hiver sont donc le produit des inondations survenues dans le temps mais de faible intensité et de vastes surfaces à nu représentant à peu de choses près la quasi totalité des surfaces labourées du bassin concerné. (...)

En revanche les **catastrophes de printemps** et tout particulièrement celles de mai-juin sont dues à une répartition franchement aléatoire des précipitations de type orageuses. Celles-ci dépendent également d'une conjonction climat / pratiques culturales mais de nature différente de celle décrite pour

les catastrophes hivernales. C'est en effet l'association des précipitations de courte durée mais d'intensité élevée sur des sols fraîchement travaillés en relation avec les cultures de printemps qui conduit à l'apparition de coulées turbides à l'origine des catastrophes de printemps. »

3.3.- Conclusion : vers une méthodologie de complexité progressive de cartographie du risque ruissellement

Consultée sur la méthodologie qu'elle a mise en œuvre pour la région Wallonne, Sylvia Dautrebande nous a prodigué les quelques conseils suivants, que nous proposons de garder à l'esprit dans la définition d'une méthodologie destinée à cartographier le risque ruissellement à l'échelle départementale.

« Tous les travaux que j'ai mené sur le sujet, jusqu'aux cartographies et modélisations actuelles, se sont étalés sur une quinzaine d'années à travers plusieurs projets (politique scientifique belge, EU, etc.). Je suis toujours partie des principes suivants :

- *utiliser ce qui existe et qui paraît le plus opérationnel, quitte à l'adapter ou à le transposer ;*
- *y ajouter autant que possible les « connaissances personnelles » ;*
- *partir du plus simple et ne compliquer que si le « simple » ne donne pas de bons résultats ;*
- *éviter les calibrations (calages), car cela fausse l'appréciation du modèle de calcul : si cela ne « marche » pas bien, c'est que le modèle n'est pas bon ou insuffisant, et il convient d'y apporter des améliorations ou modifications de fond (paramètres, fonctions) ;*
- *dans ce contexte, c'est la méthode SCS et les modèles associés qui se sont montrés les plus probants et les plus robustes, en tout cas dans les conditions de la Région Wallonne ;*
- *ne jamais perdre de vue que toute détermination –sols, occupation du sol, doit être vue sous l'angle de leur réaction hydrologique SCS (non agronomique ou pédologique ou autre...) en ce qui concerne le ruissellement ; et sous l'angle érosif pour la carte érosion Wischmeier (classement des sols donc différent, par exemple). Il est inapproprié d'appliquer des classements à d'autres modèles que ceux pour lesquels ils ont été construits. »*

Ces remarques supposent de façon essentielle de pouvoir disposer d'espaces de validation, en vue de construire une méthodologie progressive, dont les exemples précédents ont montré combien il était possible de la « complexifier »...

Aussi, nous proposons de procéder par la mise en œuvre des étapes suivantes, à l'issue desquelles une phase de validation au niveau des bassins versants testés sera réalisée.

- a) Notre expérience nous conduit tout d'abord à sélectionner des espaces de cartographie et de validation¹⁵ d'au maximum 100 km². Nous avons vu combien les résultats d'une telle méthodologie devaient se décliner de façon fine pour être pertinents (cf. retours d'expériences), et les cartographies présentées issues de [1], et de [3] (cartographie dynamique du risque ruissellement) se déclinent sur des bassins versants d'une dizaine de km².
- b) Les espaces à risques sont essentiellement les talwegs, espaces de concentration du ruissellement dont la méthodologie de détermination la plus simple repose sur la définition de seuils pour l'aire drainée via l'utilisation des applications des logiciels SIG existants. Avant d'envisager toute « complexification » éventuelle de la méthodologie proposée, le recensement

¹⁵ Cet ordre de grandeur pour la surface des bassins versants tests nous paraît aussi intéressant car les bassins versants correspondant, pour peu qu'ils se situent en amont de bassins versants de cours d'eau jaugés, sont susceptibles de disposer d'une station hydrométrique, dont l'exploitation serait à même d'appréhender le fonctionnement hydrologique global du bassin versant.

exhaustif des talwegs est indispensable (on a vu combien les désordres constatés pouvaient se situer à l'aval de surfaces relativement réduites, cf. [14]) ; elle suppose de pouvoir disposer, à terme, de MNT de résolution relativement fine (le 25 x 25 m disponible aujourd'hui auprès de l'IGN est-il suffisant ?).

- c) Une classification de ces talwegs via l'utilisation des deux indices présentés : l'Indice d'Efficacité développé par J. Douvinet et al. dans [20], dont les classes seront à adapter au niveau de résolution du MNT disponible, et une utilisation plus spécifique de l'indice topographique pour les secteurs de ruptures de pente et d'accumulation situés en aval des talwegs de premier/second ordre.
- d) L'introduction d'une fonction de production pourra intervenir seulement à ce stade¹⁶. Elle suppose de pouvoir disposer de données d'occupation du sol à jour, et de données pédologiques à une échelle relativement fine compte tenu de l'objectif recherché. L'étude de sensibilité menée dans [6] révélant que des cartes de sols au 1/250 000 permettent difficilement d'identifier des zones plus petites que la centaine de km².

Or ces cartes sont aujourd'hui disponibles de façon hétérogène sur le territoire français (données issues du site de l'INRA).

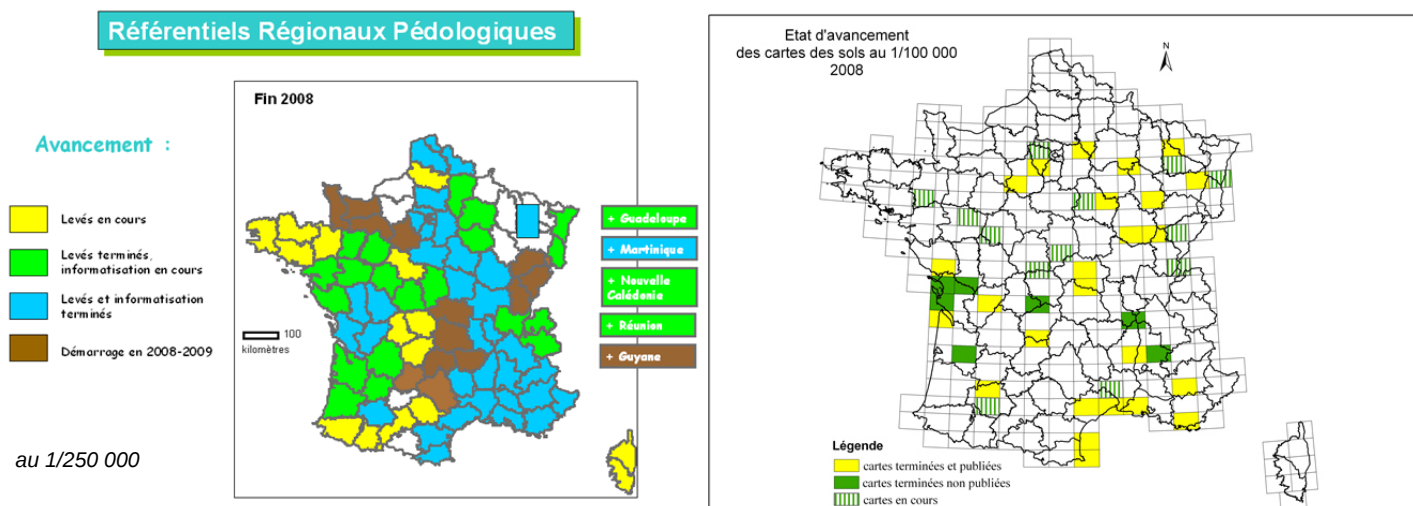


Figure 29 : disponibilité des données sols fin 2008 (site de l'INRA). Nous ignorons si les cartes au 1/100 000 sont effectivement disponibles sous format SIG

Parmi les 3 méthodologies présentées, nous proposons d'utiliser de façon privilégiée la méthodologie développée en [1] compte tenu de sa « facilité » de mise en œuvre, et de la possibilité offerte d'une « complexification » croissante. Elle suppose cependant de pouvoir associer aux types de sols définis dans les bases de données disponibles, les groupes hydrologiques définis dans la méthode du SCS.

La méthodologie développée par P. Le Goué [3] nous paraît à envisager dans un second temps, compte tenu de sa relative complexité : elle permet cependant d'aboutir à une base de données Sols très exhaustive, et à une échelle fine du rendu (ici l'îlot PAC), peut-être la seule à même de cartographier de façon satisfaisante une fonction de production. A ce titre le département du Calvados nous paraît un espace particulièrement propice en vue de tester une méthodologie, compte tenu de la masse des données disponibles issue de l'important travail mené par le laboratoire Geophen.

¹⁶ Elle peut être nécessaire « plus en amont » en vue de disposer des secteurs sur lesquels il conviendrait d'intervenir prioritairement en terme de limitation du ruissellement « agricole »

La méthodologie développée par l'INRA et le BRGM [2] fait l'objet de réserves quant à l'application des règles de pédo-transferts nationales à l'échelle départementale en vue de déterminer les classes de battance (cf. [3]). Si nous ne pouvons conclure sur ce thème qui s'écarte de notre champ de compétence, la méthodologie proposée pourrait cependant faire l'objet d'une application comparative avec la méthodologie précédente au niveau du département du Calvados sur la base des mêmes données Sols, et d'occupation, à l'échelle de l'îlot PAC. On a vu aussi que pour une application en vue d'une cartographie du risque ruissellement, on sera amené dans le cadre de cette méthodologie à écarter le critère érodibilité (cf. chapitre 1.5.).

Comme on l'a vu précédemment, le facteur « production » pourrait être intégré via l'utilisation de seuils variables des surfaces drainées dans la détermination des talwegs (cf. exemple des pentes pondérées par l'aire « ruisselante » évoquée en [5] et [6]), et dans le calcul d'un indice topographique où on intégrera la surface « active » du bassin versant amont.

- e) la prise en compte de l'aléa climatique ne nous paraît à aborder qu'à ce stade, dans la mesure où on a vu combien les phénomènes estivaux pouvaient correspondre à une répartition aléatoire ([14] et [16]). Elle a sans doute un intérêt dans le cadre d'une cartographie saisonnière du risque ; en période « hivernale », il sera alors intéressant d'introduire cet aléa via dans un premier temps une simple notion de cumul de hauteurs précipitées sur une durée donnée (10 jours par exemple), en vue d'intégrer une variation de la fonction de production en période hivernale.
- f) enfin, l'aspect dynamique du ruissellement hortonien vu à travers la méthodologie [3] à l'échelle de bassin versant (cf. 2.1.1., recensement des espaces directement ou indirectement connectés...) ne nous paraît à envisager qu'à ce stade tant elle suppose un recensement important de données, peu accessibles faute d'une enquête de terrain très fine. La mise en évidence d'autres dynamiques (cf. ruissellement de sub-surface et nappe de versant (2.1.2.)) qui pourrait influencer les espaces de productions du ruissellement (aires contributives saturées) ne nous paraît aussi à envisager qu'à terme ; elle sera aussi sans doute à lier à un aléa climatique.

A Blois, le 25 août 2009
Stéphane PINEY, LRPC de Blois

Bibliographie

- [1] Cartographie des zones à risque de ruissellement et d'érosion en région wallonne : Méthodologie et cas pilotes. S. Dautrebande, et Ir. F. Colard. Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux. 87 p., février 2003
- [2] Guide méthodologique pour un zonage départemental de l'érosion des sols. Rapport n°3 : Synthèse et recommandations générales. Cerdan O., Le Bissonais Y., Souchère V., King C., Antoni V., Surdyk N., Dubus I., Arrouays D., Desprats J. F.. BRGM, INRA, 85 p., décembre 2006.
- [3] Modélisation et cartographie de l'aléa érosion des sols et des espaces de ruissellement dans le département du Calvados. Rapport d'étude. P. Le Gouée et D. Delahaye. Laboratoire Geophen, université de Caen Basse Normandie. 235 p., septembre 2008 ;
- [4] Modélisation et cartographie de l'aléa d'érosion des sols à l'échelle régionale. Exemple du département de l'Aisne, 16 p., Y. Le Bissonais, N. Dubreuil, J. Daroussin et M. Gorce, Étude et gestion des sols, volume 11, 3, 2004, p. 307 à 321
- [5] Guide méthodologique pour un zonage départemental de l'érosion des sols. Rapport n°1 : Étude de sensibilité sur le département de l'Herault. J.F. Desprats, A. Bourguignon, O Cerdan, Y. Le Bissonais, A. Colmar. BRGM , 65 p. décembre 2006
- [6] Guide méthodologique pour un zonage départemental de l'érosion des sols. Rapport n°2 : Étude de sensibilité sur le département de l'Oise. N. Surdyk, O.Cerdan, I.G. Dubus, BRGM , 63 p. décembre 2006
- [7] Les crues de rivières en Basse Normandie : expression d'un système hydro géographique complexe en milieu tempéré océanique, Université de Caen. Thèse de doctorat. E. Agasse, mars 2005
- [8] Érosion hydrique des sols en France , Y. Le Bissonais, J. Thorette, C. Bardet, J. Daroussin, 106 p., INRA, IFEN, novembre 2002
- [9] Paramétrisation du potentiel de ruissellement des bassins versants au moyen de la Télédétection et des Systèmes d'Information Géographiques, 20 p., E. Blanchard, C. King, Y. Le Bissonais, A. Bourguignon, V. Souchère, J.F. Desprats, P. Maurizot, février 1999
- [10] TOPMODEL : principes de fonctionnement et application. C. Obled et I. Zin, 12 p., INP Grenoble, ENSHMF, LTHE, La Houille Blanche, n°1-2004
- [11] De l'eau qui tombe à l'eau qui s'écoule. Processus de transferts à l'échelle des versants du bassin versant. 30 p. Hydrologie continentale, Partie III. Claude Cosandey, Mark Robinson - Armand Colin.
- [12] Analyse et modélisation du transfert de particules solides à l'échelle du petits bassins versants cultivés, Université d'Orléans. Thèse de doctorat. O. Cerdan. 186 p., juin 2001
- [13] Soil Conservation Service Curve Number method : How to mend a wrong soil moisture accounting procedure ? Michel C., Andréassian V., Perrin C., 2005. Water Resources Research 41, W02011.
- [14] Ruissellements péri-urbains. Retours d'expériences en région Centre et Basse-Normandie. 2 rapports (12 p. octobre 2003, 22 p. janvier 2005). J.C. Jouanneau, S. Piney, LRPC de Blois.
- [15] Élaboration et mise en œuvre de Dispositifs pour la GEstion des Territoires générant des COulées Boueuses (DIGET-COB). Programme Risque Décision Territoire. P. Martin et al., 101 p., juin 2007.
- [16] Comité national français de géographie. Commission « Hydrosystèmes continentaux » CODAH, Le bassin versant de la Lézarde. Sortie de terrain du 23 septembre 2005, E. Hauchard 33 p.

septembre 2005, dans Hydrosystèmes normands, journées 2005.
<http://www.unicaen.fr/ufr/geographie/geophen/IMAGE/CFG%20Hydrosyst%E8mes%20Continental%202005.pdf>

- [17] Maîtrise du ruissellement et de l'érosion. Conditions d'adaptation des méthodes américaines. J. J. Grill et B. Duvoux, 157 p. Cemagref 1991
- [18] Natural Resources Conservation Service. Urban Hydrology for Small Watersheds. Technical Release TR-55, juin 1986. 164 p. <http://www.hydrocad.net/pdf/TR-55%20Manual.pdf>
- [19] Le coefficient de compacité de Gravelius : analyse critique d'un indice de forme des bassins versants. H. Bendjoudi et P. Hubert, 9 p.. Journal des sciences hydrologiques, décembre 2002
- [20] De la morphométrie à un champ de mesure de l'efficacité structurelle du bassin versant. J. Douvinet, D. Delahaye, P. Langlois, 14 p. SOGEO'2007
- [21] Ruissellement et risque majeur. Phénomènes, exemples et gestion spatiale des crues. Martine Guiton, 1998. 315 p. LCPC

Ressources, territoires, habitats et logement
Énergie et climat Développement durable
Prévention des risques Infrastructures, transports et mer

**Présent
pour
l'avenir**

CETE Normandie Centre
11 rue Laplace – CS 2912 41029 BLOIS Cedex
téléphone : 02 54 55 49 00
courriel : prenom.nom@developpement-durable.gouv.fr
<http://www.cete-normandie-centre.developpement-durable.gouv.fr>