



HAL
open science

IRIP Project: Literature report on the flood by runoff mapping

J. Dehotin, Pascal Breil

► **To cite this version:**

J. Dehotin, Pascal Breil. IRIP Project: Literature report on the flood by runoff mapping. [Rapport de recherche] *irstea*. 2011, pp.34. <hal-02595953>

HAL Id: hal-02595953

<https://hal.inrae.fr/hal-02595953v1>

Submitted on 15 May 2020

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

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



HAL Authorization



Rhône-Alpes Région

Projet IRIP : Rapport bibliographique Cartographie de l'aléa inondation par ruissellement

Analyse bibliographique

Janvier 2011

DEHOTIN J. , BREIL P.

Cemagref – Lyon, Unité de Recherche Hydrologie-Hydraulique

Cemagref – centre de Lyon, 3 bis quai Chauveau
CP 220, 69336 LYON cedex 09 FRANCE
Tél : (+33) 4 72 20 87 87
Fax : (+33) 4 78 47 78 75



Sommaire

I – Définitions des terminologies utilisées.....	3
II Etat des connaissances disponibles autour du ruissellement.....	8
II.1 - Le processus physique du ruissellement : De la production du ruissellement	8
II.2 - De la production du ruissellement à la cartographie des zones inondables par ruissellement.....	13
II.3- Outils et modèles existant pour la simulation ou la cartographie du ruissellement	18
III- Quels critères pour identifier les zones sensibles aux inondations par ruissellement?	21
III.1 Retour sur quelques inondations en France où le ruissellement a été mis en cause	21
III-2 Facteurs de prédisposition du milieu naturel au risque d'inondation par ruissellement.	27
III.3- Analyse des approches existantes : Apports et limites.....	29
IV- Les questions à résoudre pour la mise au point d'un indicateur du risque d'inondation par ruissellement	30
V- En conclusion de cette étude exploratoire	30
Références Bibliographiques.....	0

Ce document fait un point sur les travaux contribuant à définir et évaluer un risque d'inondation par ruissellement. A partir des travaux existants sur le ruissellement, et de réflexions complémentaires alimentées par des cas observés ou étudiés par le Cemagref en territoire rural, cette synthèse présente les outils disponibles, leurs avantages et inconvénients, les compléments de recherches à mener pour la prévision des zones présentant de tels risques. D'autres contextes, comme la prévention des inondations par débordement de rivière ou encore la conception d'aménagements pour la maîtrise des écoulements, ne sont pas abordés dans ce document.

Le document se compose de 4 parties : (1) des définitions et terminologies, essentielles pour préciser le sens des expressions techniques utilisées (2) un état des lieux des connaissances disponibles autour du ruissellement en tant que phénomène hydrologique, (3) des réflexions sur les facteurs favorisant l'émergence de zones sensibles aux inondations par ruissellement, et (4) une synthèse des barrières qu'il nous semble nécessaire de lever pour la mise au point d'un indicateur particulièrement dédié aux risques d'inondation par ruissellement.

I – Définitions des terminologies utilisées

Bassin versant :

Un bassin versant ou bassin hydrographique, est une portion de territoire délimitée par des lignes de crête dont les eaux alimentent un exutoire commun : cours d'eau, lac, mer, océan, etc.



Figure 1 : Exemple de bassin versant (source : www.prim.net)

Processus hydrologique :

Les processus hydrologiques sont des mécanismes physiques de transformation et de transfert de l'eau dans les bassins versants, en réponse à des événements climatiques comme un événement pluvieux, l'ensoleillement, etc.. Le ruissellement est un processus hydrologique parmi d'autres, comme par exemple l'infiltration, l'évaporation, les écoulements souterrains.

Événement pluvieux :

La pluie peut être considérée comme une succession d'événements identifiés par un flux d'eau temporaire (les notions de début, fin, durée), qui parvient à la surface du sol avec une intensité variable dans le temps, pour constituer un cumul lié à une aire donnée (un pluviomètre, une parcelle, un bassin versant¹). Ces événements sont le résultat de phénomènes météorologiques dynamiques, étendus dans l'espace, et observables (radar, satellites).

Écoulement concentré, écoulement diffus

¹ Définition donnée plus haut.

Un écoulement est dit concentré s'il permet à un flux d'eau important de circuler au travers d'une section étendue dans les deux dimensions (lit d'une rivière, canalisation, fond de vallon). Il est qualifié de diffus s'il nécessite pour un flux important de circuler au travers d'une section étendue majoritairement suivant une direction donnée.



Figure 2 : Illustration d'écoulements diffus (à gauche) et concentré (à droite), sur une parcelle agricole du bassin versant de l'Orgeval en Seine-et-Marne (Photos B. Augeard)

Ruissellement :

Le ruissellement est défini en hydrologie comme un processus d'écoulement de l'eau, à la surface du sol (de manière diffuse ou concentré dans des chenaux temporaires). Cette définition concerne les écoulements diffus sur des versants ruraux ou sur les sols de zones urbanisées, par opposition en dehors des écoulements en rivière ou dans des canalisations. La distinction n'est pas rigoureusement nette, certains cours d'eau ou fossés aux écoulements très éphémères pouvant être assimilés à des formes concentrées du ruissellement.

Le ruissellement rural peut être qualifié d'intense dès lors qu'il peut rejoindre des axes d'écoulement marqués après un cheminement diffus de plusieurs dizaines de m sur des sols non imperméabilisés. Il peut résulter de pluies soutenues, intenses ou de la fonte neigeuse qui gorge les sols d'eau et les rend momentanément imperméables. Il est à noter aussi que les coulées de boues et l'érosion des sols sont souvent associées au ruissellement.

Le ruissellement urbain devient gênant dès lors qu'il dépasse la capacité d'évacuation des exutoires artificiels. Il résulte principalement des pluies intenses.

Crue :

Une crue correspond à une augmentation temporaire du débit d'un cours d'eau, qui dépasse plusieurs fois le débit moyen. Suivant l'importance de la crue, les eaux des rivières peuvent déborder de leur lit mineur, voire de leur lit majeur pour créer des inondations. Ces inondations sont qualifiées d'inondations par débordement de rivière.

Inondation :

D'après la Directive cadre du parlement européen (DCE Parlement Européen 2007), une inondation est une « submersion temporaire par l'eau de terres qui ne sont pas submergées en temps normal. Cette notion recouvre les inondations dues aux crues des rivières, des torrents de montagne et des cours d'eau intermittents méditerranéens ainsi que les inondations dues à la mer dans les zones côtières et elle peut exclure les inondations dues aux réseaux d'égouts ».

Il existe plusieurs mécanismes d'inondation : Les inondations par débordement de cours d'eau, les inondations par intrusion marine, les inondations par ruissellement d'eaux pluviales ou encore les inondations par rupture d'ouvrages de retenue d'eau. Ces différents mécanismes

peuvent cohabiter lors d'une inondation et il est difficile d'identifier les mécanismes en jeux lors d'une inondation.

Au voisinage d'un cours d'eau permanent, la submersion peut en général être reliée directement (mais pas seulement) à l'augmentation du débit de cette rivière. En cas de ruissellement, la submersion peut toucher une zone très petite sans prédisposition et éloignée de tout cours d'eau (ex. Lors de pluies très intenses sur un versant plat où l'évacuation naturelle ou artificielle est temporairement dans l'incapacité de jouer son rôle) comme sur les photos de la figure 3.



Figure 3 : champ (à gauche) et maisons (à droite) inondés par ruissellement (source : Vigneron, 2006)

Inondations par ruissellement :

Les inondations par ruissellement sont des inondations liées à des écoulements de surface sur des versants en zones rurales ou dans des zones urbaines. Il s'agit souvent d'événement qui se caractérise par une extrême rapidité. Les eaux de ruissellement transitent par des chemins tracés par la micro topographie pour soit s'accumuler dans des dépressions causant des inondations, soit rejoindre un thalweg ou un cours d'eau. Lors du cheminement les eaux de ruissellement peuvent causer des dégâts grâce à l'énergie de l'écoulement (déstabilisation d'ouvrages par sapement mais aussi par mise en pression, arrachement de revêtement routier -voir figure 4-, coupure de routes, boues dans des habitations etc.). Ce mécanisme d'inondation se distingue des inondations liées aux débordements de rivières, même si parfois ces deux formes de submersion peuvent avoir lieu simultanément (ex. ruissellement sur surface saturée en zone alluviale proche d'une rivière elle-même en crue). Les eaux de ruissellement peuvent provenir d'événements pluvieux, du déversement ou de la rupture d'un ouvrage de rétention, du débordement de réseaux d'assainissement ou d'eaux pluviales ou encore de la fonte de neige.

Il existe d'autres définitions des inondations par ruissellement. Ainsi, selon Desbordes (2006) les inondations par ruissellement sont provoquées par « les seules précipitations tombant sur l'agglomération, et (ou) sur des bassins périphériques naturels ou ruraux de faible taille, dont les ruissellements empruntent un réseau hydrographique naturel (ou artificiel) à débit non permanent ou à débit permanent très faible, et sont ensuite évacués par le système d'assainissement de l'agglomération [ou par la voirie] ».

Il ne s'agit donc pas d'inondation due au débordement d'un cours d'eau permanent, traversant l'agglomération, et dans lequel se rejettent les réseaux d'eau de pluie. Cette définition insiste sur la taille des bassins (petits) et sur le passage dans l'agglomération et sa capacité d'évacuation.



Figure 4 : Illustration de traces d'inondation par ruissellement. Ici dégradation de chaussée, bassin versant de la Mérentaise, Essonne (Photos Y. Nédélec)

Carte des zones inondables :

D'après la Directive cadre du parlement européen (DCE Parlement Européen 2007), « les cartes des zones inondables couvrent les zones géographiques susceptibles d'être inondées selon les scénarios suivants : (i) Crue de faible probabilité ou scénarios d'événements extrêmes ; (ii) crue de probabilité moyenne – période de retour probable de 100 ans ; (iii) crue de forte probabilité, le cas échéant. »

Aléa :

Le portail de prévention des risques majeurs² définit l'aléa comme « un événement potentiellement dangereux ». Dans le cadre des inondations, il peut s'agir de la hauteur et la durée de submersion, de la vitesse d'écoulement.

Baladès *et al* (2003) définissent l'aléa comme « la manifestation d'un phénomène naturel. Il est caractérisé par sa probabilité d'occurrence (décennale, centennale, etc.) et l'intensité de sa manifestation (hauteur et vitesse de l'eau pour les crues, magnitude pour les séismes, largeur de bande pour les glissements de terrain, etc.) » Avec de nombreuses années de mesures et l'utilisation de modèles éprouvés, la quantification de l'aléa 'crue' peut s'effectuer de manière courante au moyen de cette probabilité, également exprimée sous forme d'une période moyenne de retour. Dans le cas du ruissellement il n'existe pas de données de débit mesurées. Par ailleurs, la définition de l'aléa paraît délicate compte tenu des multiples variables associées qui sont facteur de risque comme le transport solide, l'épaisseur et la vitesse moyenne d'une lame d'eau en mouvement, la profondeur d'un volume d'eau retenu en place, vitesse moyenne d'un écoulement concentré, taux de matières en suspension, concentration solide, ainsi que l'absence d'une définition *a priori* du lieu de passage du flux ruisselé.

Vulnérabilité :

Caractéristiques d'un système pouvant potentiellement subir des conséquences négatives, de dommages suite à un aléa (Projet floodsite³ : Integrated Flood Risk Analysis and Management Methodologies).

Pour Baladès *et al* (2003), c'est la « propension d'une personne, d'un bien, d'une activité, d'un territoire à subir des dommages suite à une catastrophe naturelle d'intensité donnée ».

² <http://www.prim.net>

³ <http://www.floodsite.net/>

Dans le cas du ruissellement, l'érosion qui accompagne souvent les écoulements liés au ruissellement est un facteur de risque supplémentaire qui implique de considérer d'autres formes de vulnérabilité que celles rencontrées dans le cas des débordements de cours d'eau. On peut citer la dégradation de routes ou d'ouvrages linéaires, dégradations d'ouvrages enterrés affleurant comme des regards, des avaloirs ou d'ouvrages superficiels comme des pieds de murs, des poteaux en conséquence du charriage de pierres et de blocs.

Risque d'inondation :

D'après la Directive cadre du parlement européen (DCE Parlement Européen 2007), le risque d'inondation est « la combinaison de la probabilité d'une inondation et des conséquences négatives potentielles pour la santé humaine, l'environnement, le patrimoine culturel et l'activité économique qui est associée à une inondation ».

Dans le cas des débordements de cours d'eau, la combinaison est quantifiée par la comparaison des niveaux de l'aléa et de la vulnérabilité.

Facteur de prédisposition au ruissellement :

Cette notion désigne d'une part le concept de production, caractérisant en hydrologie la prédisposition 'naturelle' ou pas d'une zone donnée à générer du ruissellement. Des facteurs que l'on peut qualifier de facteurs de prédisposition favorisent l'apparition d'un écoulement de surface en dehors des lieux attendus. Par exemple : des zones à rupture de pente marquée, des sols très peu perméables, des zones agricoles sujettes au phénomène de battance etc.

Si certains de ces facteurs peuvent être spatialisés *a priori*, d'autres sont difficilement cartographiables malgré leur forte influence au niveau local sur la genèse, le transfert et l'accumulation des eaux de ruissellement. Il s'agit des facteurs liés à des caractéristiques très locales, à la micro-topographie, par exemple les micro-dépressions, les. Leur rôle dans un contexte de prévision est donc à considérer et nécessite une analyse spécifique à petite maille d'espace ou tout du moins la reconnaissance de contexte favorable à leur existence.

Facteurs pouvant aggraver le ruissellement :

Il s'agit de facteurs souvent anthropiques (mais pas seulement) qui favorisent la production, le transfert ou l'accumulation des eaux de ruissellement dans son cheminement à travers le bassin versant. On peut citer dans cette catégorie, les facteurs comme, l'imperméabilisation des sols, les pratiques culturales, les obstacles transversaux aux lignes d'écoulement (talus, haies, remblai, route...), comblement d'un exutoire naturel temporaire etc.. D'autres facteurs naturels comme l'évolution géomorphologiques, l'érosion peuvent accentuer le transfert des eaux de ruissellement en leur offrant des chemins préférentiels.

Certains de ces facteurs peuvent être cartographiés, et leur rôle déterminé *a priori* peut être intégré de manière qualitative dans un contexte de prévision.

II Etat des connaissances disponibles autour du ruissellement

II.1 - Le processus physique du ruissellement : De la production du ruissellement

Dans la littérature, les approches utilisées pour le calcul et la simulation du ruissellement, peuvent être regroupées en deux catégories : Les approches 'urbaines' et les approches 'rurales'.

a) En milieu urbain :

En milieu urbain, l'imperméabilisation des sols augmente l'aptitude au ruissellement, en réduisant fortement la capacité d'infiltration. Lors d'événements pluvieux, les eaux de pluie ruissellent (à cause du refus d'infiltration) en suivant les chemins délimités par la voirie urbaine pour rejoindre un réseau d'assainissement, un réseau d'eaux pluviales, une rivière ou encore s'accumuler dans des zones de dépression. L'occupation des sols et la topographie sont les seuls facteurs souvent considérés pour expliquer l'apparition du ruissellement et son accumulation en milieu urbain. La topographie est le moteur de ces écoulements par l'effet de la force de la gravité. Les méthodes d'évaluation des volumes d'eau de ruissellement ont été largement développées en hydraulique urbaine.

La méthode rationnelle d'origine nord américaine (*In* Maidment, 1993) est souvent utilisée pour déterminer le débit de pointe du ruissellement $Q(F)$ en un point exutoire. L'équation utilisée est de la forme suivante:

$$Q(F) = C(F) * I(F, t_c) * A$$

C représente le coefficient d'imperméabilisation (ou coefficient de ruissellement), I l'intensité de la pluie et A la surface drainée, t_c le temps de concentration. La valeur du coefficient C , sans dimension, est à choisir parmi des références en fonction de la nature de la surface de l'impluvium, et les unités retenues pour la pluie, la superficie, et le débit. La pluie de fréquence « F » et de durée t_c permet d'estimer le débit de pointe de même fréquence. La valeur du coefficient de ruissellement est considérée pouvoir évoluer avec l'intensité de la pluie (Mosini *et al.* 2000)⁴ et dépend donc aussi de la fréquence F . La formule est aussi appliquée au dimensionnement d'ouvrages en milieu rural pour des bassins inférieurs à 500 km². La valeur de T_c est dans ce cas de l'ordre de la journée.

La méthode de Caquot développée pour le dimensionnement des ouvrages d'assainissement pluvial (Instruction technique 1977). Elle introduit des facteurs liés à la dynamique de la formation du ruissellement :

$$Q_p = F * a * C * H / t_c * A$$

Q_p est le débit de pointe, t_c est le temps de concentration, H est la hauteur totale précipitée, a est le coefficient d'abattement spatial de la pluie, A est la surface drainée, F est un coefficient qui dépend des unités utilisées.

L'utilisation du modèle stochastique de Montana pour décrire la relation Intensité-Durée-Fréquence est retenue. Les paramètres de Montana sont fournis dans l'instruction technique de

⁴ Mosini ,M.L.,Rodriguez,F.,Andrieu,H. 2000 Propriétés statistiques de la réponse hydrologique d'un petit bassin versant urbanisé, bulletin des laboratoires des ponts et chaussées 228, pp.105-110

1977 et correspondent à un découpage Nord-Sud de la France en 3 zones. L'usage de pluies locales est conseillé si disponible mais l'intérêt des trois jeux de paramètres est l'aspect normatif qui conditionne les gammes de taille des tuyaux d'assainissement. La méthode de Caquot est très proche de la méthode rationnelle et reste conseillé pour des bassins inférieurs à 200 hectares. Au-delà le recours à des modèles d'hydrologie urbaine (bassin découpé sous bassins) avec des fonctions de transfert à base mécaniste (Barré de St Venant) est conseillé pour intégrer l'effet d'accélération ou de laminage du ruissellement par les réseaux d'assainissement (La ville et son Assainissement, 2003, édité par le CERTU). Sans rentrer dans le détail des différentes techniques d'évaluation, on retiendra que le cadre de cette évaluation est clairement défini, à partir de caractéristiques de projet (bassin versant, ici qualifié de surface drainée, période de retour) fixées pour la mise en œuvre de démarches de dimensionnement d'ouvrages, notamment des collecteurs d'assainissement.

Au cours de plusieurs cas graves d'inondations en France, le ruissellement urbain a été mis en cause (Marseille le 19 septembre 2000, Nîmes le 3 octobre 1988). Cependant, une analyse des inondations portant uniquement sur le milieu urbain occulte bien souvent les mécanismes d'apport d'eau importants provenant de versants ruraux situés à l'amont, en périphérie de ces zones urbaines. Ces eaux venues de la partie amont peuvent contribuer directement aux dommages (exemple de Nîmes, 1998) ou réduire les capacités de drainage de la zone urbaine (crues dans les rivières par exemple, surcharge par entrée d'eau dans les réseaux d'eaux pluviales), empêchant les eaux de ruissellement du milieu urbain de rejoindre leurs exutoires naturels. En complément du ruissellement urbain, il apparaît donc nécessaire d'associer celui du milieu rural.

b) En milieu 'rural' :

Le ruissellement dans la partie rurale des bassins versant est lié à des facteurs du milieu qui le prédisposent face aux événements climatiques déclencheurs (pluie, fonte des neiges). Une partie des eaux de pluie précipitée s'infiltrer directement dans le sol, et l'autre partie s'écoule en surface, rejoint la rivière ou s'infiltrer dans le sol à l'aval. Le ruissellement sur les versants en tête de bassin est souvent à l'origine de la mise en eau rapide des thalwegs secs et des torrents de montagnes (crues soudaines en tête de bassin). Une capacité d'infiltration faible peut aussi résulter d'une évolution du sol nu à mesure que les cumuls de pluie augmentent (crues produites par des limons battants, cas fréquent dans des régions comme le Pays de Caux).

Comme annoncé dans la partie définition, deux types de processus sont à l'origine du ruissellement : le ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration (mécanisme hortonien) et le ruissellement sur surface saturée.

Le ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration se produit lorsque l'intensité de la pluie est trop forte par rapport à la capacité d'infiltration du sol. Il y a accumulation d'eau en surface puis ruissellement, quel que soit l'état initial du sol. Ce type de ruissellement se produit souvent au cours d'événements pluvieux intenses ou sur des sols très secs ou encore sur des sols dont la porosité a été entièrement colmatée. En France par exemple, la zone des Cévennes est, parmi d'autres, propice à ce type de ruissellement en raison de l'intensité des pluies en période estivale comme pendant l'automne. De nombreux cas d'inondations dues au ruissellement intense ont eu lieu dans cette région suite à pluies de fortes intensités.

Le ruissellement sur sol saturé est un mécanisme de ruissellement qui produit lorsque le sol est déjà saturé et ne peut plus recevoir des apports d'eaux supplémentaires. Ce processus se produit souvent au cours d'événements pluvieux longs (pas forcément intenses) ou d'événements pluvieux qui surviennent alors que le sol est déjà saturé par de précédents événements. En France, au cours de différents événements d'inondation, l'état du sol déjà gorgé d'eau par des pluies antérieures aurait favorisé le ruissellement sur surface saturée. Il s'agit notamment des

inondations de Paris (1910), de la Somme (2001), du Gard en 2002 et 2005 et les inondations du Grand Bornand en Savoie (1987). Dans ces cas, ruissellement sur surface saturée a été probablement l'une des causes principales des ces inondations,

Estimation du volume ruisselé

Différentes approches existent pour estimer le volume des eaux de ruissellement dans la partie rurale des bassins versant suite à un événement pluvieux. Ces approches sont basées sur des formules empiriques ou sur des équations déduites de la physique des écoulements. Parmi les équations de calcul du ruissellement, deux catégories peuvent être distinguées.

Les formules empiriques consistent à calculer la capacité d'infiltration en fonction du temps. Les lames d'eaux ruisselées sont alors déduites de la différence entre l'intensité de la pluie et la capacité d'infiltration (qui varie en fonction du temps). On trouve ci-dessous quelques exemples d'équations couramment utilisées pour estimer le ruissellement.

Equation de Horton (Horton 1940)

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c) * e^{-kt}$$

f représente la capacité d'infiltration du sol à l'instant t

f_0 est la capacité d'infiltration initiale

f_c représente la capacité d'infiltration à l'équilibre ou capacité au champ ou vitesse d'infiltration profonde

k est un coefficient permettant de contrôler la diminution exponentielle de l'infiltration. Il est fonction de la nature du sol.

Elle représente l'évolution de la capacité d'infiltration en fonction du temps au cours d'un événement pluvieux.

Equation de Holtan (1961)

$$F(t) = f_c + a * (S - F(t)) * n$$

f représente la capacité d'infiltration du sol à l'instant t

a est la surface moyenne du couvert végétal exprimée en pourcentage de la surface totale

f_c représente la capacité d'infiltration à l'équilibre ou capacité au champ ou vitesse d'infiltration profonde

S est le potentiel de stockage d'eau de la couche superficielle du sol

F est l'accumulation ou la diminution d'infiltration

n est un coefficient constant pour un sol donné

Cette formule empirique est très proche de celle de Horton. Ces formules sont utilisées dans nombre de modèles hydrologiques pour exprimer la partie ruisselée. Elles ne permettent pas de gérer l'évolution du stockage entre les pluies car ce dernier dépend non seulement de l'infiltration profonde (f) mais aussi des écoulements latéraux dans le sol et de l'évapotranspiration.

Equation de Green-Ampt (Green and Ampt 1911)

$$i(t) = K_s (1 + (b_0 - b_f) / z_f(t))$$

K_s est la conductivité hydraulique à saturation, b_0 la charge de pression en surface, b_f la charge de pression au front d'humectation et z_f la profondeur atteinte par le front d'humectation.

Equation de Phillip (Philip 1957)

$$F(t) = A + 1/2 * S * t^{1/2}$$

F représente la capacité d'infiltration du sol à l'instant t

A est une composante gravitaire, fonction de la conductivité hydraulique à saturation.

S est la sorptivité du sol

Equation de Smith-Parlange (Smith and Parlange 1978)

$$f = K_s \frac{\exp(F/B)}{(\exp(F/B) - 1)}$$

f est l'infiltration potentiel, K_s est la conductivité hydraulique à saturation, F est le cumul de l'infiltration, et B est un paramètre du déficit de saturation ($B = G(\theta_s - \theta_i)$). G est la capillarité effective nette, θ_s est la teneur en eau du sol à saturation et θ_i la teneur en eau initial du sol.

Ces équations permettent d'estimer le ruissellement au cours d'un événement avec une approche de bilan (Volume de ruissellement = Pluie - \sum infiltration). Une deuxième catégorie d'équations permet de calculer directement le débit de ruissellement en utilisant les informations sur l'intensité pluviométrique et la capacité d'infiltration du sol. Dans cette catégorie, on retrouve les équations suivantes :

La méthode du Curve Number du SCS (maintenant Natural Resources Conservation Services NRCS) :

$$Q = (P - I_a)^2 / (P - I_a + S)$$

Q est le débit de ruissellement, P est l'intensité de la pluie, I_a est l'intensité de pluie nécessaire pour initier le ruissellement (il est souvent approché par la capacité d'infiltration du sol). S est un indicateur de la capacité de stockage, relié au "Curve Number" CN par la relation $CN = 1000 / (10 + S)$. CN prend des valeurs entre 0 et 100 et représente un indicateur fonction de l'occupation des sols, et du type de sol. Le terme $(P - I_a)$ est encore appelé pluie effective. Les paramètres de cette équation sont évalués soit à partir d'analyse d'événement (chronique pluie/débit) soit à partir d'ajustement à de modèles (moindre carré).

La méthode Débit-Durée-Fréquence appliqué aux petits bassins versants à écoulement rapide par ruissellement (Galéa et Ramez, 1985)⁵

A l'origine ce modèle de nature stochastique est construit sur la seule connaissance des débits mesurés sur plusieurs centaines de bassins versants en France compris entre quelques dizaines et quelques centaines de kilomètres carrés pour l'essentiel. Il permet de décrire trois familles principales de régime de crues et intègre le régime des pluies en extrapolation. Il a fait l'objet en 1985 d'une adaptation et d'une validation aux petits bassins versants de quelques hectares à quelques kilomètres pour répondre au besoin du dimensionnement des ouvrages de rétention du transport érosif dans les vignobles en forte pente. Cette adaptation a été réalisée au travers de la prise en compte de la méthode du SCS pour décrire le phénomène de saturation du

⁵ Maîtrise du ruissellement et de l'érosion en coteau de vignoble : guide à l'usage des aménageurs Galea, G. Ramez, P., 1995 , 128 p., Cemagref Editions

sol. Il a aussi été validé⁶ en modélisation du ruissellement urbain par comparaison avec des modèles urbains plus sophistiqués. Le modèle est basé sur la formule du SCS qui fait intervenir la pluie décennale sur la durée du temps de concentration. Il est « calé » localement à l'aide de 2 paramètres que sont le débit décennal instantané et la durée caractéristique de crue, qui sont fonction uniquement de la surface de production.

Les quantiles de crues sont ainsi fournis par les relations :

• **Domaine des crues observées : $T \leq 10$ ans**

$$Q(T,d) = A_q(d) \text{Log}T + B(d)$$

• **Les paramètres A_q , A_p et B varient en fonction de la durée d selon une forme homographique:**

$$f(d) = 1/(a d + b) + c$$

• **Domaine des crues extrêmes: $T \geq 10$ ans**

$$Q(T,d) = Q(10,d) + A_p(d) \text{Log} \left[1 + \frac{A_q(d)}{A_p(d)} \frac{T-10}{10} \right]$$

On introduit l'information pluie $A_p(d)$ afin de prédéterminer des crues plus rares que celles observées

Les formules déterministes sont basées sur la physique du phénomène ne sont pas simples à mettre en oeuvre. Elles nécessitent souvent l'utilisation de modèle, qui intègrent des équations locales de comportement, comme celles-ci-dessous, et appliquent de manière spatialisée ces équations locales. Dans ces modèles, les paramètres spatialisés indispensables (répartis sur le territoire modélisé) sont souvent indisponibles. Cela implique des hypothèses de valeurs moyennes et donc des incertitudes locales non quantifiées. Le calage à l'échelle du bassin versant des paramètres transforme ces modèles d'essence mécaniste en modèle conceptuels dans lesquels la signification physique des paramètres disparaît.

Equation de continuité (Woolbiser et al. 1990)

$$db/dt + dQ/dx = r + A_f f$$

b est la charge hydraulique locale, Q le débit par unité de largeur, r est la pluviométrie, A_f est un facteur d'humidité variant entre 0 et 1. f est le taux d'infiltration. Le débit par unité de largeur est évalué par l'onde cinématique en utilisant l'équation de Manning.

Equation de richards

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right]$$

K est la conductivité hydraulique, ψ est la pression, z est l'élévation suivant la direction verticale, θ est la teneur en eau et t est le temps.

Cette équation dynamique permet de rendre compte de la variation par unité de temps de la teneur en eau du sol sous l'effet des forces de gravités et de succion qui en milieu non saturé s'opposent sur la verticale. Les sols sont plus secs en surface du fait de l'évapo(trans)piration. $K(\theta)$ et $\psi(\theta)$ évoluent de manière inverse avec θ . L'adjonction à cette équation de termes source et puits figurant la pluie et le processus d'évapo(trans)piration permettent de simuler les alternances

⁶ Inondabilité du ruisseau du Ravin et de son bassin versant Gilard, O. Gendreau, N. Breil, P. Tschudy, E.1997 Rapport d'expertise de l'étude d'aménagement hydraulique du Ru du Balory ; Breil, P. & Poulard, C. 2002.

d'humectation et de ressuyage d'un sol. Ce n'est pas le cas des autres équations « d'infiltration » présentées. Il est aussi possible d'intégrer un terme d'hystérésis qui rend le temps de ressuyage plus long que le temps d'humectation. Cependant la connaissance des relations $K(\theta)$ et $\psi(\theta)$ dépend des textures et structure des sols qui peuvent varier considérablement à l'échelle de quelques kilomètres carrés.

On peut envisager d'utiliser cette équation comme un modèle conceptuel de simulation d'un réservoir sol soit à partir d'un calage pluie-ruissellement si des données sont disponibles, soit à partir d'une estimation « moyennée » des fonctions $K(\theta)$ et $\psi(\theta)$.

On trouve à partir de ces principes une littérature scientifique abondante sur la modélisation du ruissellement à l'échelle du bassin versant, en général sur des sites suffisamment connus et instrumentés. Dans tous les cas, la pluie et le bassin versant sont des données fixées pour le problème, ce qui convient assez bien à une problématique de dimensionnement ou d'aménagement pour la prévention. Nous verrons qu'en matière de prévision à court terme, et de prédétermination une connaissance plus précise de la pluie et des variables intra-bassin peut s'avérer nécessaire.

II.2 - De la production du ruissellement à la cartographie des zones inondables par ruissellement

Les formules présentées dans le paragraphe précédent permettent de calculer la production de flux de ruissellement et ne préjugent pas du devenir de ces eaux. La production de ruissellement ne se traduit pas toujours par un risque d'inondation puisque les eaux qui le constituent peuvent soit s'infiltrer à l'aval, soit rejoindre un cours d'eau ou encore s'accumuler en un lieu non vulnérable. En effet, les eaux de ruissellement produites lors d'un événement pluvieux suivent le cheminement dessiné par la topographie (ravines, rigoles, micro topographie) ou des structures artificielles (dérayures, fourrières et sillons agricoles, fossés, talus, remblais, chemins etc.). Les écoulements peuvent être piégés par la configuration topographique du milieu (cuvettes) ou par les structures artificielles barrant la route à l'écoulement (réseaux linéaires, digues, etc.).

La notion d'inondation par ruissellement est liée aux deux formes du devenir de ces eaux : accumulation en aval d'une zone de production ou en un point particulier sur les axes précédemment cités.

Le ruissellement peut-être directement responsable des inondations dans des zones éloignées de tout ruisseau et de toute rivière (exemple photos). Dans beaucoup de cas il contribue par des écoulements rapides en surface (en zone urbanisée ou en zone rurale) à la formation de crues rapides et dévastatrices à travers la mise en eau rapide des thalwegs. Ce phénomène engendre bien souvent des crues qualifiées de torrentielles, puisqu'elles concernent les thalwegs en tête de bassin, à pente prononcée, rarement mis en eaux. Dans de nombreux cas le ruissellement est associé à des phénomènes de coulées de boues, des torrents et crues soudaines dans les thalwegs secs en tête de bassins ou sous-bassins versant.



Figure 5 : Exemple d'inondation loin de tout cours d'eau. A gauche, route inondée (chatel-de-neuvre 2008) ; et a droite, un chemin de randonnée fortement incisé par le ruissellement (transport de matériaux) et transformé en rivière (Villiers-Escalles 1997).



Figure 6 : Résultats d'Inondation par crues/ laves torrentielles depuis des versants
 Photo de droite : St Geoire en Valdaine 7 juin 2002,. Source : IRM Rhône Alpes.
 Photo de gauche : Andorre, novembre 1982. Source : M. Vila i Riba.

En présence de matériaux disponibles les crues torrentielles peuvent évoluer en laves torrentielles où le fluide est plus dense que l'eau et peu transporter des matériaux très lourds. Cette charge solide peut aussi entraîner le changement de lit d'un cours d'eau par suite d'accumulation ponctuelle importante d'embâcles arrachés aux rives sous la forme d'arbres de blocs rocheux ou d'éléments d'ouvrages. Dans le cas de thalwegs de tête les lits sont peu marqués et la divagation de l'écoulement concentré va dépendre de la forme des versants. La formation et rupture d'embâcles en séquences pourraient aussi expliquer le phénomène de « vague de submersion » décrit par les populations touchées. Ces ruptures interviendraient après l'accumulation d'eaux moins chargées derrière les embâcles. Les concomitances relevées entre certains affluents d'habitude décalés pourraient aussi s'expliquer par la libération subite d'une lame d'eau accumulée juste avant confluence en replat. Cet enchaînement d'effet est peu étudié ainsi que les conditions de sa réalisation alors que les conséquences en sont dévastatrices (cf photo ci-dessus).

a) Approches utilisées dans la littérature pour identifier des zones susceptibles d'être inondées par ruissellement

Il existe peu d'approches mises en pratique pour identifier *a priori* des zones susceptibles d'être inondées par ruissellement, encore moins pour quantifier un risque associé à ces zones. Pourtant, le ruissellement (en milieu urbain ou sur les versants ruraux) est souvent évoqué dans les inondations notées en classe 4 (état de catastrophe naturelle) ou 3 (accidents très graves) en France. Le rapport de mission du Ministère de l'écologie (Baladès *et al.* 2003) montre du doigt cette insuffisance ou absence de la prise en compte du risque d'inondation lié au ruissellement pluvial. Les travaux de Nédélec (2009) illustrent à travers des exemples le phénomène de d'inondation par ruissellement et l'importance qu'il peut avoir dans certains cas. Ils apportent aussi les éléments de réflexion pour la prise en compte du ruissellement dans l'aménagement. La plupart des approches existantes se sont tournées vers la cartographie des zones de production de ruissellement dans le cadre de la lutte contre l'érosion des parcelles agricoles. Le ruissellement est en effet un facteur important, voire majeur dans l'érosion des sols, et l'enjeu socio-économique est suffisamment important. Les initiatives se sont alors multipliées sur la question de l'érosion d'origine hydrique. Les méthodes ou modèles développés sont centrés sur les zones de production du ruissellement qui permettent la détermination des zones à risque d'érosion.

Les démarches utilisées pour identifier les zones susceptibles d'être inondées par ruissellement peuvent être séparées en trois catégories :

- celles basées sur l'analyse d'un modèle numérique de terrain pour identifier les zones qui présentent des risques de ruissellement.
- une deuxième catégorie regroupe des démarches consistant à croiser des facteurs de prédisposition au ruissellement, pour cartographier les zones à risque.
- la troisième catégorie repose sur la modélisation hydrologique.

□ Approches basées sur l'analyse topographique

Elles utilisent l'analyse de l'information topographique. La pente ou l'indice topographique de Beven (Beven and Kirkby 1979), calculés à partir d'un modèle numérique de terrain (et disponible dans la plupart des SIG existant) sont utilisés pour identifier des zones considérées à risque d'inondation par ruissellement. En effet, plusieurs rapports d'étude (pour des SAGE en particulier) montrent qu'il permet de localiser les zones humides. C'est donc un révélateur de zone à potentiel de ruissellement par saturation du sol.

Cette approche a été utilisée par l'AAC (Agriculture et Agroalimentaire Canada) pour déterminer à l'échelle des parcelles agricoles des zones à risque d'inondation par ruissellement sur surface saturée.

Les approches basées sur l'utilisation de la topographie ont l'avantage de la simplicité. Elles permettent aussi de limiter les incertitudes par rapport aux échelles des paramètres et leur disponibilité. Néanmoins, hormis des contextes locaux très particuliers, elles ignorent le rôle que peuvent jouer les états de surface (l'occupation des sols, la nature du sol, l'humidité du sol etc.). Pourtant dans de nombreux cas d'inondation en France, l'état de surface est mis en cause dans le ruissellement et jouerait un rôle d'amplification. Comme exemple, les inondations et coulées de boues récurrentes en Seine-Maritimes et dans le Calvados où les parcelles agricoles nues sont sujettes à des ruissellements et des érosions fréquentes. Les inondations de Paris, de Nîmes (1988) et de Vaison-La-Romaine (1992) ont toutes été associées à des phénomènes de ruissellement sur des sols déjà saturés (donc à l'état de surface). Par ailleurs l'approche basée sur le seul paramètre de la topographie se heurte au problème des zones 'plates' où les algorithmes d'analyse du modèle numérique de terrain génèrent des chemins fictifs.



Figure 7 : Versant agricole producteur de ruissellement diffus sur versants plan à faible pente (épisode observé), pouvant se concentrer vers l'aval, Maisse, Essonne (Source : Y. Nédélec)

□ Approches basées sur le croisement de facteurs

Elles sont plus élaborées et plus répandues. Elles consistent à croiser différents facteurs du milieu qui prédisposent à la production du ruissellement, afin de cartographier les zones les plus exposées. Les facteurs souvent utilisés sont la topographie, l'occupation des sols, le type de sol et une ou plusieurs pluies de référence. Ces facteurs ont un rôle dans l'apparition du ruissellement aussi bien par le processus hortonien que par ruissellement sur surface saturée. La combinaison des facteurs varie selon les auteurs.

L'INRA (Cerdan *et al.* 2002) utilise la topographie, l'occupation des sols, les caractéristiques des sols et la pluie pour localiser le risque de ruissellement et d'érosion sur des bassins agricoles.

L'université de Caen (Le Gouée & Delahaye 2008) considère les pratiques culturales, la topographie et l'intensité de la pluie. Plusieurs sous-facteurs liés aux pratiques culturales sont également intégrées. Dans cette approche basée sur les îlots de cultures, les zones à risque de ruissellement et d'érosion sont identifiées sur la base de l'analyse de la topographie, de l'érodibilité des sols (stabilité structurale), des pratiques agricoles (durée d'interculture et type de rotation de culture). Cette approche ne prend pas en compte la production de ruissellement en dehors des zones agricoles. Elle n'est pas applicable dans des unités spatiales où il n'existe pas d'exploitations agricoles.

L'université de Rouen a développé le modèle RuiCells (Langlois & Delahaye 2002) qui permet la simulation hydrologique. L'objectif est la cartographie des sensibilités au ruissellement catastrophiques.

C'est l'approche également utilisée par la Faculté des sciences agronomiques de Gembloux (Belgique) dans le cadre de la cartographie des risques de ruissellement (Dautrebande & Colard 2003). La méthodologie proposée consiste à distinguer des zones à risque de ruissellement diffus et des zones à risque de ruissellement concentré. La carte des risques de ruissellement diffus est réalisée à partir de l'occupation des sols, de la pente et du classement 'hydrologique des sols' (Méthode SCS). La carte des risques de ruissellement concentré est basée sur le croisement de la pente, des axes de concentration (à partir du MNT), de la taille du bassin et du report de voiries.

L'USDA (le Département Américain de l'Agriculture) a développé l'équation universelle de perte de sol (Wischmeier & Smith 1978) très utilisée dans l'évaluation de l'érosion. Un modèle dérivé de cette équation (le modèle RUSLE) est basé sur le principe de croisement de facteurs, notamment de la topographie, l'occupation des sols et la nature des sols.

□ Approches basées sur la modélisation physique des versants

Des études utilisent la modélisation physique des bassins versant pour cartographier le ruissellement. Il s'agit souvent d'analyser des événements passés afin de mieux comprendre la dynamique des écoulements à l'échelle des bassins versants. C'est le cas des études réalisées dans les Cévennes sur les inondations du Gard 2002 (Gaume *et al.* 2003; Gaume *et al.* 2004; Manus *et al.* 2009; Sandrine *et al.* 2009). Les modélisations ne se limitent pas forcément au ruissellement mais représentent l'ensemble du cycle de l'eau, pour mieux appréhender au sein de ce dernier le rôle spécifique du ruissellement.

A plus petite maille d'espace, cette approche est utilisée dans des modèles tel que LISEM (de Roo *et al.* 1996), ANSWERS (Beasley *et al.* 1980), KINEROS (Smith 1981; Woolhiser *et al.* 1990) ou WEPP (Nearing *et al.* 1989) pour cartographier le ruissellement et l'érosion (voir II.3). Ces modèles n'intègrent que le processus de ruissellement et simulent son évolution de l'amont vers l'aval au moyen de fonctions de transfert plus ou moins complexes. A l'image des approches précédentes le ruissellement produit dépend du sol, du type de culture, de la pluviométrie et de la saison. Dans ce cas, les auteurs n'utilisent pas d'aléa pluviométrique, mais des intensités pluviométriques détaillées considérées homogènes à l'échelle des bassins versants.

□ Pratiques au niveau des pouvoirs publics et des collectivités territoriales

Au niveau réglementaire, il existe des dispositions légales attribuant à l'état et aux collectivités locales la responsabilité de mener une action de prévention (Vigneron & Guezo 2006). L'Etat s'assure de la mise en place de cette prévention au travers des PPRI (Plan de Prévision des Risques d'Inondation). Les collectivités locales ont la responsabilité de mettre en place des moyens d'information pour les populations et l'organisation des plans de sauvetage. Elles doivent aussi intégrer le risque d'inondation y compris par ruissellement dans leur Plan Local d'Urbanisme (PLU). Les Programmes d'Action de Prévision des risques liés aux Inondations (PAPI), sont aussi des instruments permettant aux collectivités locales et aux pouvoir public d'identifier les secteurs susceptibles d'être touchés par les inondations afin d'engager des travaux ou de prendre des mesures de protection adéquates.

Afin de répondre à ces exigences légales, les collectivités locales et l'Etat font appel à des études pour identifier les zones à risque d'inondation et les actions à envisager pour en réduire l'aléa et la vulnérabilité. Dans le cas du ruissellement, il ne se détache pas de méthodologie d'identification arrêtée. Le traitement de ce risque en particulier résulte d'initiatives largement liées aux contextes locaux, en particulier elles se focalisent sur des situations vécues. La méthodologie utilisée est souvent basée sur l'analyse des pentes et de l'occupation des sols. Comme exemple, on peut citer la détermination des zones sensibles au ruissellement dans le cadre du PAPI Dordogne (Epidor 2006). L'approche utilisée est celle proposée par l'INRA. Les outils dont disposent les collectivités pour la prévention et la réduction du risque (Vigneron & Guezo 2006) sont essentiellement des outils de planification (le schéma de cohérence territoriale, le plan local d'urbanisme, le zonage d'assainissement, le schéma directeur d'aménagement et de gestion de l'eau, le contrat de rivière), des outils d'aménagement (aménagement d'espace public par techniques alternatives pour la gestion des eaux pluviales, restauration d'aménagement limitant le ruissellement).

Dans la région Rhône-Alpes, le Grand -Lyon intègre dans son PLU un zonage d'assainissement réalisé par des bureaux d'étude qui ont utilisé une méthode basée sur l'utilisation de l'occupation des sol, de la topographie et des aménagements pour définir des carte de vulnérabilité et des cartes de sensibilité aux enjeux. Ces deux cartes sont croisées pour définir une carte des risques. Cette approche plutôt orientée contexte urbain est difficilement applicable en zone péri-urbaine ou rurale où les informations sur le sol et la géologie peuvent avoir une importance capitale. Les risques spécifiques liées aux zones agricoles n'ont pas été intégrées et finalement l'ensemble des facteurs pouvant concourir au risque n'est pas intégrés dans cette analyse.

Les approches proposées ci-dessus ne permettent pas encore de répondre efficacement à la question de la gestion du risque d'inondation par ruissellement face aux obligations réglementaires des pouvoirs publics.

b) Les travaux en cours au niveau national

Les attentes ont évolué, le BRM (Bureau des Risques Météorologique) et le SHAPI (Service de Prévision) animent des travaux sur un projet de ruissellement. L'objectif du projet qui prendra fin en décembre 2011 est de fournir des éléments méthodologiques nécessaires à l'évaluation préliminaire des risques d'inondation par ruissellement (EPRI). Il est prévu également d'identifier des secteurs susceptibles d'être les plus touchés et où un diagnostic poussé est à prévoir.

Des travaux visant à faire progresser les méthodes disponibles sont actuellement en cours au niveau national.

Le LRPC (laboratoire régional des Ponts et Chaussées) a initié une action de recherche (LRPC et CETE Normandie 2009) dont l'objectif est de développer une cartographie de complexité progressive du risque ruissellement. Cette méthodologie est basée sur le recensement et la classification des thalwegs, et l'utilisation d'indice d'engorgement.

Le CETE Méditerranée met la priorité sur la qualité de la caractérisation des chemins probables du ruissellement en bruitant de manière aléatoire un modèle numérique de terrain pour intégrer l'incertitude sur les altitudes.

Le Cemagref de Aix-en-provence développe une approche (SHYREG), couplant une modélisation hydrologique (type pluie-débit) et une spatialisation de chroniques de pluies pour cartographier de manière systématique sur le territoire 'l'aléa ruissellement'. Des cartes d'aléa pluviométrique servent dans ce cas au forçage des modèles hydrologiques pour déduire des cartes de production globale du ruissellement correspondant. La méthode permet une estimation des écoulements assortie d'une probabilité, sans tenir compte des dynamiques locales de transfert et de rétention des écoulements. Un travail de consolidation entre débit de ruissellement et largeur d'écoulement est annoncé en coordination avec le CETE Méditerranée

II.3- Outils et modèles existant pour la simulation ou la cartographie du ruissellement

Il existe plusieurs outils à base de modèles dans la littérature qui proposent la simulation du ruissellement. Nous donnons ci-après un aperçu (non exhaustif) de certains avec leurs domaine d'application. Il faut noter qu'il s'agit souvent de modèles développés pour la simulation ou la cartographie de l'érosion liée au ruissellement. Au nombre des modèles existant on peut citer :

Le modèle **LISEM**⁷ (Roo *et al.* 1996) est un modèle d'érosion basé sur la simulation des processus hydrologiques pour calculer le ruissellement. soit à partir de l'équation de Richard's ou des lois d'infiltration type Holtan ou Green-Ampt. Il est utilisé pour cartographier localement le risque d'érosion après un événement pluvieux à l'échelle de petits bassins versants. Il est souvent utilisé pour évaluer la conséquence de l'occupation des sols sur l'érosion. Il produit entre autre des cartes d'érosion.

Le modèle **KINEROS** (Kinematic Erosion Simulation model) est un autre modèle de simulation de l'érosion des sols (Smith 1981; Woolhiser *et al.* 1990). C'est un modèle spatialisé basé sur l'utilisation d'équation à base physique uniquement. Le bassin versant est représenté par

⁷

<http://www.itc.nl/lisem/>

une cascade de parcelles et de canaux. Le modèle intègre la description des processus d'érosion des sols, de l'infiltration, de l'évaporation et du ruissellement avec une entrée pluie au pas de temps de 15 minutes. Le ruissellement est transféré en utilisant l'onde cinématique. Le modèle est validé pour des petits bassins versants de l'ordre du kilomètre carré. Il permet aussi de simuler le transfert de la charge solide dans les rivières à partir du calcul des débits et de la charge sédimentaire.

Le modèle **WEPP** (Water Erosion Prediction Project, Forest & Lane 1987) est un modèle de simulation du ruissellement et de l'érosion à pas de temps journalier. Il est utilisé par l'USDA (United States Department of Agriculture) aussi bien sur des versants que sur des bassins versants essentiellement pour des bilans à long terme. Il prend en entrée des données sur la pluviométrie, sur le sol et sur l'occupation des sols. Il est très orienté vers l'impact des pratiques agricoles sur l'érosion. Il est doté d'un module hydrologique qui simule l'infiltration à partir des équations de type Green-Ampt. Le ruissellement est simulé en utilisant des approximations de l'onde cinématique.

Le modèle **CEQUEROSS** (Duchemin *et al.* 2001) est un modèle d'érosion hydrique à l'échelle des bassins versants. Il est basé sur l'équation universelle de perte de sol (Wischmeier & Smith 1978) et a été développé à partir d'un SIG (IDRISI) et d'un modèle hydrologique (CEQUEAU). Comme dans l'équation universelle de perte des sols USLE, ce modèle prend en compte la topographie, l'occupation des sols et la nature des sols. Il est adapté aux petits bassins versants.

Le **modèle analogique de ruissellement** (MAR) (Bader 1994) a été développé par l'ORSTOM (IRD), suite aux nombreux travaux effectués en Afrique sur le ruissellement. Il ressort de ces travaux que les états de surface ont un rôle important dans la production du ruissellement (Esteves & Rajot 1999). C'est un modèle conceptuel à trois paramètres, calés sur la topographie et sur l'antécédent pluviométrique de type Kolher, et la capacité d'infiltration du sol.

Le modèle **RuiCells** est un modèle de simulation et de cartographie du ruissellement dans des bassins versants agricoles. Il a été développé par le laboratoire MTG de l'Université de Rouen. Il est basé sur la technologie des automates cellulaires et sur un maillage irrégulier (TIN) avec cellules surfaciques (triangles), linéaires (fonds de thalweg) et ponctuelles (cuvettes). La topographie et l'occupation des sols sont les facteurs du milieu qui sont pris en compte dans ce modèle.

Le modèle **STREAM** (Sealing and Transfert by Runoff and Erosion in relation with Agricultural Management) est un modèle de simulation de la sensibilité au ruissellement et d'érosion basé sur le principe de croisement de la topographie (incluant la micro-topographie), de l'occupation des sols et de la nature des sols (Cerdan *et al.* 2002). Ce modèle prend la forme d'un arbre de décision, où différents facteurs sont croisés sous la forme de combinaisons logiques. Il est souvent utilisé à l'échelle d'une parcelle ou d'un groupe de parcelles et d'un événement pluvieux (Ponsaud 2007), mais peut être appliqué à des secteurs d'étude bien plus vastes. Des classes de sensibilité au ruissellement sont identifiées à partir du croisement des facteurs (Figure 8). Elles sont associées à une capacité d'infiltration et sont utilisées pour le calcul d'un bilan infiltration/ruissellement pour chaque maille du modèle. Ce modèle est souvent utilisé dans le contexte agricole, pour évaluer les effets de différentes organisations spatiales de parcelles sur l'importance du ruissellement et de l'érosion.

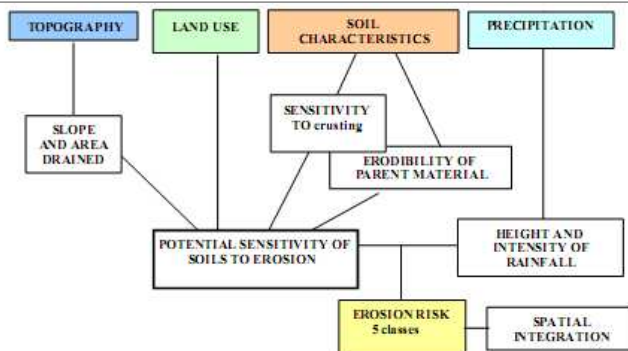


Figure 8 : Diagramme de fonctionnement de STREAM (source : INRA)

Le modèle **SCALES** du Laboratoire Géophen de l'université de Caen (Le Gouée & Delahaye 2007) a pour objectif de cartographier l'érosion à l'échelle des parcelles agricoles. Il intègre les pratiques agricoles, la topographie et l'intensité de la pluie. Il a été appliqué au Calvados (5000 km²). Les facteurs sont hiérarchisés selon leur importance dans la genèse du ruissellement érosif. La figure 9 montre les facteurs du milieu utilisés et la définition des différents niveaux de risque d'érosion. Les données d'entrée doivent être très détaillées, et la capacité d'infiltration des sols n'est pas prise en compte explicitement.



Figure 9 : Données d'entrée du modèle SCALES (Source : P. Le Gouée)

Tableau récapitulatif des principales caractéristiques des modèles présentés

Modèle	Type	Simulation :	Ech. d'application:	Vocation:
LISEM	Hybride	Événementielle	50m ² à 50 km ²	Erosion
KINEROS	Physique	Continue / 10 minutes	Parcelle -> bv 1 km ²	Erosion, TS
WEPP	Hybride	Événementielle/ 24h	Versant-> petit bv	Erosion
CEQUEROSS	Conceptuel	Continue 1h à 12h	5 m ² -> 4000 km ²	Erosion
MAR	Conceptuel	Événementielle	Parcelle	Ruissellement
RUICELLS	Automate cell.	Continue	qq km ²	Ruissellement
SREAM	Géomatique	néant	ha -> 100 km ²	Ruiss. & Ero.
SCALES	Géomatique	néant	ha-> 5000km ²	Erosion

Il existe aussi des approches adaptées aux zones urbaines, utilisées notamment par plusieurs bureaux d'étude. Cette approche consiste à croiser une carte de 'sensibilité à l'aléa' avec une carte de vulnérabilité pour cartographier le risque de ruissellement et d'érosion (Figure 10). La carte de sensibilité à l'aléa est déduite du croisement de variables topographiques (points bas, cuvettes et pentes) avec des données sur les réseaux urbains. La carte de vulnérabilité est issue des données d'occupation des sols et des données sur les enjeux (démographie, équipements etc.) associées à l'occupation des sols.

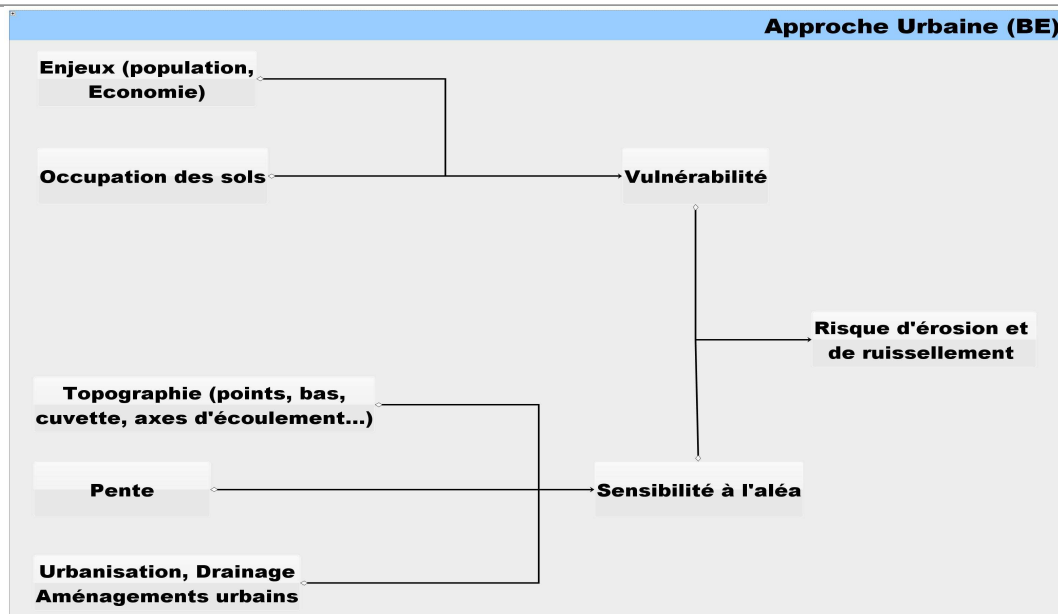


Figure 10 : Approche de cartographie du risque de ruissellement et d'érosion en milieu urbain

A la vue de ce tableau il est possible de distinguer 3 types de modèles faisant intervenir l'intensité statistique ou courante de la pluie comme moteur du processus représenté :

- Les modèles d'érosion hydrique pour simuler ou estimer le processus érosif ;
- Les modèles dédiés à la simulation du ruissellement dont la caractéristique est de travailler à petite maille d'espace (parcelle) et de temps ;
- Les modèles « géomatiques » basés sur la combinaison des facteurs pour identifier les secteurs les plus exposés à l'érosion et au ruissellement.

On pressent l'intérêt des modèles géomatiques en prédétermination alors que pour la prévision les modèles de ruissellement et d'érosion à pas de temps fins et petite surface sont plus appropriés. On distinguera dans ce dernier cas le type d'algorithme utilisé pour la modélisation. Ainsi, les modèles conceptuels ou à base physique disposent d'une large expérience qui permet d'en connaître les défauts et avantages majeurs. C'est beaucoup moins le cas aujourd'hui pour les modèles à base d'automates cellulaires utilisés en hydrologie.

Deux situations extrêmes sont a priori possibles pour provoquer le ruissellement intense : un sol sec soumis à une pluie intense comme cela peut arriver dans le sud de la France ou un sol gorgé d'eau suite à des pluies longues combinées à des facteurs défavorables (hydromorphie...) comme ce serait plutôt le cas dans le nord de la France. La première situation impose de connaître la capacité d'infiltration initiale du sol ainsi que son évolution au cours de l'événement pluvieux afin de calculer la pluie disponible (utile) pour le ruissellement. La seconde nécessite la connaissance des antécédents pluvieux et la fonction de ressuyage du sol.

III- Quels critères pour identifier les zones sensibles aux inondations par ruissellement?

III.1 Retour sur quelques inondations en France où le ruissellement a été mis en cause

Comme mentionné plus haut, parmi les inondations importantes ayant eu lieu en France, beaucoup ont été associées à des processus de ruissellement. Le ruissellement urbain est souvent mis en cause sans qu'il soit possible d'en évaluer la contribution réelle. Il arrive dans de nombreux cas, que les écoulements de surface se fassent sous la forme de coulées boueuses avec des conséquences sur les réseaux linéaires (routes, autoroutes, chemins de fer etc.) mais aussi sur des zones habitées (personnes et biens).

Nous proposons ici une revue synthétique de quelques événements historiques en se basant sur différents rapports d'experts, de chercheurs, de gestionnaires et des témoignages de riverains, afin d'identifier le rôle attribué au ruissellement dans ces inondations.

Les inondations de Paris (1910) :

De fortes pluviométries ont provoqué d'importants débordements de la Seine en janvier 1910. Dans le Dossier Départemental des Risques Majeurs de la Seine-saint Denis (DDRM), on peut lire : "Après une période de gel, les pluies diluviennes se sont abattues sur le bassin provoquant un ruissellement rapide sur sols gelés". Sur le site Internet de la DIREN île de France⁸ sur les conditions de déclenchement de la crue, on peut lire : "Cette crue est le résultat direct d'une forte pluviosité sur un sol saturé avec une concomitance parfaite des ondes de crues des bassins amont... elle est générée par deux épisodes de pluie à intervalles rapprochés. "L'antécédent pluviométrique semble avoir joué un rôle important comme le mentionne l'étude de cas (GEODE 2004): « des pluies peu intenses mais répétées et sur de vastes territoires, sévissant de fin décembre 1909 à mi-janvier 1910. La pluviométrie de cette période fut en effet largement supérieure à la normale (150 à 200% selon les secteurs du Bassin Parisien), dépassant les 100mm un peu partout, parfois nettement (150 à 160mm)". L'intensité pluviométrique les jours où se sont produit les inondations a été jugée importante mais non exceptionnelle, comparativement aux pluies cévenoles du sud de la France (GEODE 2004): « A ces phénomènes préparatoires a succédé l'averse décisive de la crue, ...affectant tour à tour les affluents de la Seine en amont de Paris. C'est surtout les 4 jours du 17 au 20 janvier qui en ont rassemblé les abats d'eau principaux : 120mm à Château-Chinon, 94 à Montbard, 82 à Bar-sur-Seine, 79 à Chaumont et à Joigny. Certes, nous sommes loin des déluges méditerranéens qui peuvent fournir 4 fois plus d'eau en 4 fois moins de temps... ».

Pour de telle surface de bassin (43 000 km²), les crues sont le plus souvent le fait de la montée des nappes alluviales et répondent aux précipitations avec un délai plus long. Le rôle de l'urbanisation sur le ruissellement ne peut être invoqué car ne représente que quelques % du bassin. La topographie (pente faible à modérée du bassin) ne semble pas être la principale cause de cette inondation (GEODE 2004). Le ruissellement par refus d'infiltration sur surface saturée ou gelée a très vraisemblablement aggravé la crue de la Seine en 1910.

Les températures basses entraînant un gel du sol sur plusieurs centimètres (de -5 à -10 °C pendant plusieurs jours par exemple) suivies d'un radoucissement avec des précipitations peuvent aussi créer un contexte favorable au ruissellement sur des petits bassins versants.

Les inondations dans le Gard (8-9 septembre 2005) :

Dans le département de l'Hérault les 6 et 7 septembre 2005, les précipitations intenses ont entraîné des « submersions urbaines » sur l'agglomération de Montpellier et la ville de Lunel. Dans le département du Gard, plusieurs communes ont été touchées par les submersions urbaines et en particulier la partie est de l'agglomération de Nîmes. Le réseau hydrographique de surface et en particulier le Vistre et le Vidourle ont atteint ou dépassé leurs cotes d'alerte en plusieurs points et ont provoqué localement des inondations.

⁸

<http://www.ile-de-france.environnement.gouv.fr/previcrue/conditioncrue1910.htm>

Le second épisode du 8 septembre à 17 heures au 9 septembre à 5 heures, a intéressé le seul département du Gard. Sur le site de l'Observatoire OHMCV⁹ (Observatoire Hydrométéorologique Méditerranéen Cévennes Vivarais) on peut lire à propos de l'événement, « Les précipitations enregistrées dans la partie ouest de Nîmes ont été supérieures à celles du premier épisode. Le ruissellement n'y ayant pas été amorti par le réseau karstique encore rempli par le premier épisode, les submersions urbaines ont été plus graves. Ailleurs, le Vistre, en particulier, a réagi plus violemment que la première fois (malgré des précipitations moindres) avec les mêmes conséquences. La première réaction de l'eau est de ruisseler de façon généralisée sur toute la zone, urbanisée ou non, intéressée par l'averse. Quand le réseau d'assainissement pluvial urbain (à ciel ouvert et/ou enterré) ne peut plus absorber le débit de ruissellement, des zones urbanisées sont submergées. » Plusieurs communes ont été reconnues en état de catastrophe naturelle par inondation et coulées de boue dans les départements des Alpes Maritimes, du Var, de l'Hérault, de l'Aude, des Bouches-du-Rhône.

Toujours selon l'observatoire OHMCV « L'important cumul pluviométrique prévu pour le premier épisode a justifié la mise en vigilance rouge par Météo-France à 11h le 6 septembre sur les départements de l'Hérault et du Gard ... Malgré une mise en vigilance météorologique moins élevée, les dégâts occasionnés par le second épisode semblent avoir été bien plus important que par ceux occasionnés par le premier ».

Comme à Paris en 1910, la succession d'événements pluvieux a été la principale cause de la catastrophe. Le premier événement pluvieux a réduit les capacités de rétention des eaux. Le second événement pluvieux moins important a provoqué du ruissellement en amont accentuant la crue et en provoquant le débordement des rivières malgré ces éléments illustrent l'intérêt d'associer l'alerte, basée sur la météorologie, à des informations de l'état « au sol ».

Les inondations de Nîmes 1988.

Les jours précédents, les pluies auraient saturé les terrains perméables de la garrigue, diminuant d'autant les capacités de rétention d'eau. L'intensité pluvieuse moyenne a été mesurée à 50 mm/h pendant environ 6 heures consécutives. L'épisode s'est concentré sur l'agglomération avec une valeur maximale des précipitations dépassant 420 mm en 6 heures (en moyenne 70mm/h) sur les hauteurs de la ville. Il s'agit de pluies de forte intensité.

Selon divers rapports sur l'événement, (ex : Ponton 1989), « les inondations sont liées au ruissellement sur des petits bassins versants aux pentes assez fortes qui dominent immédiatement la ville ». L'urbanisation des versants et le déboisement auraient augmenté le coefficient de ruissellement et diminué le temps de concentration des eaux aux exutoires de ces petits bassins. Enfin, les ouvrages linéaires (routes, chemins de fer, ponts...) auraient joué un rôle de barrage temporaire aux écoulements, permettant l'accumulation de l'eau avant sa libération soudaine par endroits.

Les fortes intensités pluvieuses, couplées à une conjugaison de facteurs défavorables du bassin versant récepteur (pente, occupation des sols, ouvrages en travers et embâcles) semblent avoir été les éléments importants des inondations de Nîmes.

Inondation et coulées de boues à Belledonne les 21, 22, 23 et 24 août 2005

Les crues de plusieurs torrents du massif de Belledonne sont responsables des dégâts importants observés dans 16 communes du massif et de la vallée (Domène, Abondance, Les Contamines-Montjoie, Vacheresse). L'événement a été déclaré rare mais non exceptionnel par l'Institut des Risques Majeurs (IRM). Le cumul est inférieur à 300mm sur 48 heures. De nombreux torrents ou ruisseaux sont pourtant sortis de leur lit (Domenon, Vorz, Gleyzin, Breda

⁹ <http://ltheln21.hmg.inpg.fr/OHM-CV>

etc.). Au total 19 communes ont été déclarées en état de catastrophe naturelle car les dégâts ne sont pas seulement survenus dans la plaine. Ainsi à Revel (700m d'altitude), un habitant déclarait (Institut des Risques Majeurs) « On ne pensait pas que le niveau pouvait monter ici. On pensait que compte tenu de la pente, tout, irait en bas ».



Figure 11 :Maison endommagée (gauche) et d'une route communale détruite (droite)

Sur le site de l'IRM on peut lire « quatre mois après les inondations, raconte Mme Garrigues, habitante dans le lotissement des Chênevières a Domène, a été inondée par plus de 1,20 mètres d'eau et de boue. Elle dit qu'il ne pleuvait pas et qu'il n'y avait pas de raison particulière de s'alarmer car le ru n'avait pas l'habitude de déborder ».

L'intensité pluviométrique n'est pas en cause dans ce cas mais il y a bien eu plusieurs jours de pluie. Les sols ont probablement été saturés avant la catastrophe. Le contexte topographique caractérisé par de fortes pentes a certainement contribué à accentuer l'inondation. La montée rapide des eaux dans les torrents résulte sans doute du ruissellement en tête de bassin, en lien avec l'état saturé des sols.

Dans le cas présent, on note l'absence de signes annonciateurs sur le lieu de la coulée de boue. Il en ressort l'intérêt d'étudier les axes et temps de transfert depuis les zones de production. C'est a priori un cas où la vigilance puis l'alerte peuvent contribuer à la sécurité des personnes et des biens.

Inondation de Grand Bornand 1987

« ...Un orage intense, bref et très localisé a provoqué un ruissellement intense sur une zone déjà saturé auparavant ». C'est en ces termes que Meunier (1988) décrit les événements qui ont précédé la crue torrentielle ayant provoquée le 14 juillet 1987 la mort de 24 personnes. Le ruissellement de surface aurait été très important, ainsi que les phénomènes de transport solide (Comby 1990) « Montée des eaux très rapide et fort débit avec transport important de matériaux graveleux et de végétaux, ont provoqué de nombreux dégâts, notamment des obstructions de ponts, avec dépôts dans les rues du Grand-Bornand ». La nature des sols de faibles épaisseurs sur un substratum schisteux ainsi que la topographie ont été mentionnées comme facteurs aggravant. « Le camping s'est trouvé transformé en dérivation du torrent (voir figure ci-dessous) du fait des fortes pentes ». On notera que le changement de lit est réalisé au droit du pont de l'Envers, ce qui montre l'importance des obstacles et zones d'accumulation sur le chemin pris par l'inondation. Sur le site de la prévention des risques majeurs¹⁰, on peut lire « La couverture végétale du bassin est comme suit 20 % de forêts et 46 % de pâturages. La surface urbanisée n'est que de 2,5 %, les 30% restant étant constitués par les sommets rocheux de la chaîne des Aravis ». La concomitance des crues des deux torrents résulterait d'une pluie localisée sur le bas du Borne, affluent du Grand Bornand, malgré des temps de concentration bien différents. .

Il est tombé 93.2mm en 3 heures (en moyenne 31mm/h). Il apparaît donc que l'intensité de la pluie a du jouer un rôle dans la catastrophe, comme l'ont mentionné les études et rapports des services météorologiques (Comby 1990). Toutefois, il semblerait aussi qu'une série d'autres

¹⁰ <http://www.prim.net/risqnat/chap4/doc/4-6-2.htm>

prédispositions du site ont probablement aggravé les conséquences de la pluie. Notamment, les fortes pentes combinées à la nature des sols, ainsi qu'à l'état d'humidité des sols (déjà saturé avant l'événement), ainsi que la faiblesse de la couverture forestière.

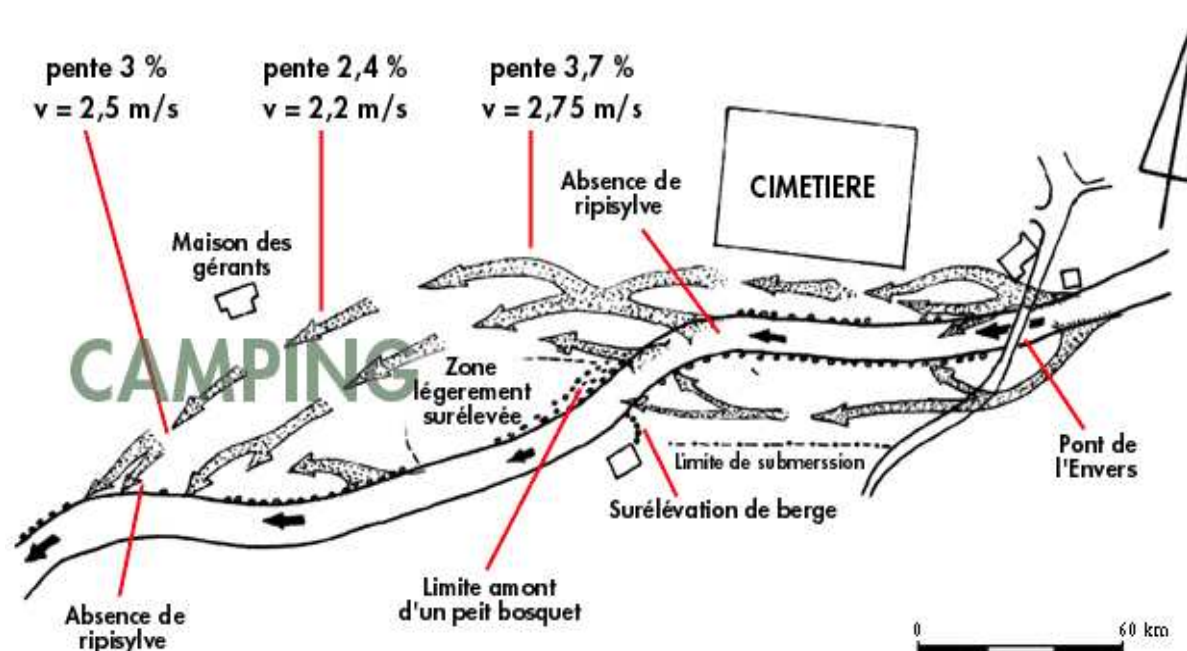


Figure 12 : Le Grand Bornand : Circulation des principaux courants en aval du Pont de l'Envers (calcul des vitesses par Meunier 1990). Source : MEDD, RNM.

Inondations de la Somme, 2001

Trois années consécutives de pluies exceptionnelles dans la région, a favorisé une augmentation du niveau des nappes souterraines. Selon le rapport du Sénat (Deneux et Martin 2001) sur l'événement, « Pendant un mois, de fin février à fin mars, la vallée connaît des inondations sporadiques et des mouvements de terrain localisés... A la fin du mois de mars, l'inondation commence à progresser lentement. Quarante cinq communes enregistrent à des degrés divers une montée du niveau des eaux ». Au niveau des dégâts, on dénombre « ...108 communes touchées, 3.500 caves et habitations inondées, plus de 1.100 personnes évacuées... ». La réduction des capacités d'évacuation des eaux pluviales liée à une importante remontée de nappe, a favorisé ici la réduction de l'infiltration et l'engorgement des structures d'évacuation du ruissellement urbain.

Les inondations ne sont donc pas dues dans ce cas à des intensités de pluies exceptionnelles mais à une saturation des sols naturels et des exutoires artificiels.

Inondations en haute-Normandie

En Seine-maritime (Haute-Normandie), plusieurs inondations récurrentes sont attribuées au ruissellement. On peut citer les exemples des communes de Fécamp (1998, 1999, 2000), Villiers-Escale (1997), Saint-Valery en Caux, Saint Opportune etc. Dans cette région, l'intensité des pluies n'atteint pas celle des régions méditerranéennes. De plus, le contexte topographique n'est pas aussi contrasté qu'en Savoie par exemple. Pourtant les inondations par ruissellement sont fréquentes et souvent accompagnées de coulées de boue. En lien aux parcelles agricoles, à la nature du sol et à la topographie locale.

Il ressort de ces exemples la nécessité de considérer plusieurs facteurs pour identifier les zones exposées au risque d'inondation par ruissellement. Ainsi, les cumuls

glissants sur les températures sous zéro et la pluviométrie ainsi que sur l'évolution des niveaux piézométriques pourraient s'avérer des indicateurs accessibles et utiles.

A l'échelle d'un petit bassin, la modélisation hydrologique pourrait s'avérer être une méthode d'évaluation de la « fonction de ressuyage » nécessaire à l'évaluation de la capacité de stockage. C'est cependant la composante la plus mal restituée par les modèles hydrologiques de transformation de la pluie en débit quelque soit leur niveau de complexité (conceptuel, physique,..). Les raisons en sont diverses : critères de calage / optimisation, incertitude sur les paramètres physiques distribués, inclusion dans la fonction de production qui doit représenter les évolutions positives et négatives sans considérer un possible hystérésis. Cela se traduit soit par une réaction trop rapide et violente soit trop tardive et molle des crues simulées par rapport aux crues observées. Sur le choix entre modèle de simulation en continu ou événementiel pour simuler le ressuyage, on peut penser que les premiers sont plus adaptés car les seconds nécessitent l'entrée d'un état initial toujours problématique à définir.

III-2 Facteurs de prédisposition du milieu naturel au risque d'inondation par ruissellement.

Au vu des événements présentés dans le paragraphe précédent, il convient de noter la diversité des contextes météorologiques dans lesquelles les inondations par ruissellement ont eu lieu. Il en ressort qu'en dehors de la pluie, différents facteurs et états du milieu récepteur participent à la production, au transfert et à l'accumulation de lames d'eau ruisselées. Souvent une combinaison défavorable de facteurs (et pas toujours les mêmes) ont été à la base des inondations par ruissellement étudiées dans le paragraphe précédent. Nous proposons une analyse des facteurs du milieu prédisposant une zone au risque d'inondation par ruissellement. La pluie, facteur déclencheur n'est pas intégré à ce niveau d'analyse.

Afin d'identifier les facteurs du milieu prédisposant au risque, il est nécessaire de prendre en compte la nature du phénomène de ruissellement. Comme il a été mentionné plus haut deux principaux processus hydrologiques sont à l'origine du ruissellement : Les écoulements de surface suite à un dépassement de la capacité d'infiltration des sols par l'intensité de pluie et les écoulements de surface suite à un refus d'infiltration en raison de la saturation préalable du sol. Chacun de ces processus est influencé par différents facteurs du milieu.

Facteurs du milieu favorisant ou limitant le risque de ruissellement :

Parmi les facteurs souvent cités dans la littérature, on peut noter la topographie, l'occupation des sols et le type de sol. Ces facteurs ont un rôle dans l'apparition du ruissellement aussi bien par le processus hortonien que par le processus de ruissellement sur surface saturée. Ces facteurs ne semblent pas agir toujours avec le même degré d'importance selon les événements. Les facteurs prédisposant un sol à la production du ruissellement hortonien sont : l'occupation et l'état de surface du sol (les sols nus sont plus favorables que les sols sous un couvert végétal) ; le type de sol (les sols à faibles capacités d'infiltration sont les sols fins : argileux ou limoneux), et la topographie (les zones à faibles pentes sont moins propices au développement du mécanisme Hortonien, contrairement aux zones en fortes pentes). En ce qui concerne le ruissellement sur surface saturée, la présence d'une nappe souterraine ou d'une couche perméable de faible épaisseur au-dessus d'une couche de sol peu perméable sont des facteurs qui prédisposent à ce mécanisme. L'eau de pluie s'infiltrer, recharge la nappe ou crée une nappe perchée, le sol se sature « par le bas ». L'eau qui tombe sur ces surfaces saturées ne peut plus s'infiltrer. Elle s'accumule donc puis ruisselle.

La topographie est un facteur très important dans la genèse et l'accumulation des eaux de ruissellement. Plusieurs variables issues de la topographie influencent le processus du ruissellement. La *pente* est la variable topographique la plus utilisée. Les zones à faibles pentes sont moins propices au développement du mécanisme Hortonien, contrairement aux zones en fortes pentes. Les zones ayant de fortes pentes ont tendance à favoriser la production et le transfert du ruissellement. L'accumulation d'eau est favorisée par l'existence de cuvettes (ou dépression locale), ou de rupture de pente (pente forte/pente faible). La pente agit donc aussi bien dans la production et le transfert que dans l'accumulation de l'eau. D'autres variables issues de la topographie sont parfois utilisées. *L'indice topographique* (Beven & Kirkby 1979) est un indicateur de la capacité d'engorgement. Cet indicateur a été validé pour la localisation des zones humides (Mérot et al. 2003) est utilisé par certains auteurs pour identifier les zones favorables à la production de ruissellement sur surface saturée par refus d'infiltration. D'autres variables issues de la topographie comme les aires drainées, les indices de compacité et points bas sont souvent utilisés dans la littérature.

Le type de sol et formation géologique sont aussi des éléments importants dans la genèse du ruissellement, mais aussi dans la persistance de la submersion dans les zones où les eaux de ruissellement s'accumulent. Deux principaux variables sont souvent citées dans la littérature : *La*

texture et l'épaisseur du sol. Les sols fins ont des capacités d'infiltration faibles et sont plus propices à la production de ruissellement par le mécanisme de Horton. De même, les zonées ayant des *affleurements rocheux* sont productrices de ruissellement. Dans les zones agricoles les sols riches en limons sont parfois sujet au phénomène de '*battance*'. Il se traduit par la formation d'une couche imperméable à la surface des sols nus qui réduit les capacités d'infiltration des sols et favorise le ruissellement. De ce fait, certaines approches de modélisation du ruissellement, notamment sur les parcelles agricoles intègrent le taux de limon comme facteur à risque pour le ruissellement (dépassement de la capacité d'infiltration). L'épaisseur du sol joue également un rôle important dans l'apparition du ruissellement sur surface saturée. En effet, le réservoir que constitue le sol (même à forte perméabilité) est susceptible d'être rempli plus vite qu'il ne se vidange ce qui conduit à la saturation du sol par remontée de nappe. L'infiltration devient alors impossible et le surplus d'eau ruisselle. Cette situation peut également survenir lorsque le profil de sol est formé d'horizons avec des contrastes de perméabilité. Il se forme alors une nappe perchée qui sature temporairement le sol si l'apport des pluies dépasse la vitesse d'évacuation de l'horizon le moins perméable. Enfin des variables comme le taux de matière organique peut être aussi important, car la présence de matière organique peut augmenter la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol.

Dans les zones où une *nappe souterraine peu profonde* existe (exemple : nappes perchées de formations alluviales), il peut y avoir un refus d'infiltration par le remplissage du 'réservoir' du sol. Comme on l'a vu avec les événements de la Somme (2001), on peut assister à une saturation du sol par élévation du niveau de la nappe et l'apparition de ruissellement en surface.

L'occupation des sols est un élément qui peut intervenir dans le sens de la diminution ou de l'aggravation du risque de ruissellement. *L'imperméabilisation* des surfaces favorise la production et le transfert du ruissellement. De la même manière, les *sols agricoles* sont réputés pour leur aptitude à la production de ruissellement. Plusieurs travaux ont démontré le rôle de l'organisation spatiale des parcelles agricoles et des pratiques culturales dans la production du ruissellement (Le Bissonnais *et al.* 1998; Le Gouée & Delahaye 2008). A l'inverse, les *sols recouverts de végétaux* agissent d'abord contre la production du ruissellement en augmentant la capacité d'infiltration (racines, litière, bioturbation etc.), en augmentant les capacités de stockage du sol. Ensuite les sols avec un couvert végétal freinent la propagation de l'onde de ruissellement en diminuant la vitesse des écoulements en surface.

Les sols forestiers souvent situés en partie amont des versants constituent des réservoirs efficaces en raison d'une grande perméabilité. Leur fonctionnement hydrologique reste cependant très controversé. Il semble que la capacité de rétention puisse être efficace jusqu'à un certains niveau d'engorgement au-delà duquel les transferts latéraux, via la macro-porosité (bioturbation, vide racinaire, fracturation, arénisation) pourraient devenir importants sous l'effet des pentes et viendraient alors renforcer les écoulements de surface. Un fonctionnement à seuil en quelque sorte.

III.3- Analyse des approches existantes : Apports et limites

Les méthodes (modèles) présentés dans la partie II.3 ont vocation à prédéterminer à l'échelle locale la prédisposition d'un milieu à générer du ruissellement et par voie de conséquence de l'érosion hydrique. Aucune des ces méthodes ne développe la notion d'enjeu autre que celui de la limitation de l'érosion des terres agricoles.

Les méthodes basées sur l'analyse topographique ont l'avantage de la simplicité et de la disponibilité des données sur l'ensemble du territoire. Elles présentent le défaut d'ignorer les états de surface (occupation, nature, humidité du sol) qui d'après les exemples d'inondations cités jouent un rôle déterminant, soit d'amplification, soit de réduction. Par ailleurs le seul paramètre topographique se heurte au problème des surfaces planes (inclinaison comme peuvent l'être les versants agricoles ou horizontales comme les fonds de vallée).

Le concept d'analyse décrit dans le guide du MEDD de Juin 2003 sur le risque d'inondation (ruissellement péri-urbain), consiste à identifier trois éléments dans un territoire : les zones de production/ ou d'aggravation par l'activité humaine (formation), les secteurs ou chemins d'écoulement (transfert) et les secteurs d'accumulation où l'eau est ralentie ou bloquée. Il prend tout son intérêt pour le ruissellement de versant et les crues/laves torrentielles susceptibles de ne pas suivre les thalwegs.

Certaines méthodes sont très détaillées et permettent de simuler les zones de production, de transfert et éventuellement d'accumulation. Les données nécessaires à ces méthodes sont très détaillées compte tenu d'une application à la parcelle et par conséquent pas toujours disponibles sauf à consentir des moyens adaptés. En l'absence de ces données, des hypothèses simplificatrices ne peuvent qu'accroître les incertitudes sur les résultats.

Les méthodes basées sur le croisement de facteurs « géomatiques » sont une alternative intéressante. Toutefois, elles sont limitées à la détermination des zones de production du ruissellement. Comme nous l'avons mentionné précédemment, les zones susceptibles d'être inondées par ruissellement ne sont pas forcément les zones de production. Elles peuvent se situer dans des axes de transfert ou des aires d'accumulation. C'est donc un aspect essentiel à développer pour la prise en compte des enjeux.

De même la connaissance des facteurs qui vont conditionner les crues et les laves torrentielles paraît fondamentale car ces formes de ruissellement nécessitent de déterminer des chemins différents des thalwegs principaux. La gamme des enjeux est aussi différente : il ne s'agit pas d'une montée des eaux par débordement d'un thalweg mais d'une vague consécutive à une rupture d'obstacle(s) et au pouvoir érosif et destructeur important.

IV- Les questions à résoudre pour la mise au point d'un indicateur du risque d'inondation par ruissellement

Suite à l'analyse ci-dessus les questions suivantes émergent pour arriver à la définition d'une méthodologie de cartographie adaptée au ruissellement intense.

- Comment déterminer les territoires susceptibles d'héberger des phénomènes de production, de transfert et d'accumulation ruissellement ?
- Quels sont les données d'entrée nécessaires à l'identification de telles zones? Et à quelle échelle faut-il les considérer ?
- Quels facteurs de prédisposition au ruissellement faut-il utiliser pour la détermination des zones l'aléas inondation par ruissellement ?
- Quels usages peut-on faire des cartes d'aléas en fonction de la précision des données d'entrée ?
- Comment intégrer dans la cartographie de l'aléa inondation par ruissellement les questions relatives aux incertitudes sur les cartes produites ?

L'analyse réalisée dans ce document met en évidence l'importance des contextes sur les processus de génération du ruissellement intense. La connaissance de la pluie seule n'est pas suffisante. Il existe aujourd'hui un manque de recul sur ces facteurs déclencheurs qui sont remplacés par des hypothèses de travail dans les modèles. **Il paraît nécessaire de constituer une base de cas connus et de cas « frais » sur lesquels développer une analyse selon le concept production/transfert/accumulation. Il est aussi nécessaire de mettre un accent particulier sur la détermination de l'aléa ruissellement, de manière à intégrer l'influence de l'ensemble des différents paramètres au sol (pas uniquement la topographie). Enfin, une prédétermination des zones à risque est particulièrement importante dans les contextes où les sinistres liés au ruissellement sont caractérisés par une grande rapidité, ne laissant que très peu de temps de réaction pour les opérations d'alertes et de secours.**

V- En conclusion de cette étude exploratoire

Cette étude montre que les méthodes existantes pour caractériser le risque d'inondation par ruissellement pourraient être impliquées dans des démarches opérationnelles de prévision en améliorant la prise en compte des spécificités liées à la dynamique du ruissellement et à l'accumulation d'eau en dehors des cheminements usuels. En l'état actuel des connaissances, il n'existe pas de méthode permettant d'identifier les zones à risque de ruissellement, tant qu'un certain nombre de réponses n'ont pas été apportées. L'étude que nous allons mener permettra d'aborder les questions qui sont posées ci-dessus et proposer un ou plusieurs indicateurs du risque d'inondation par ruissellement.

Références Bibliographiques

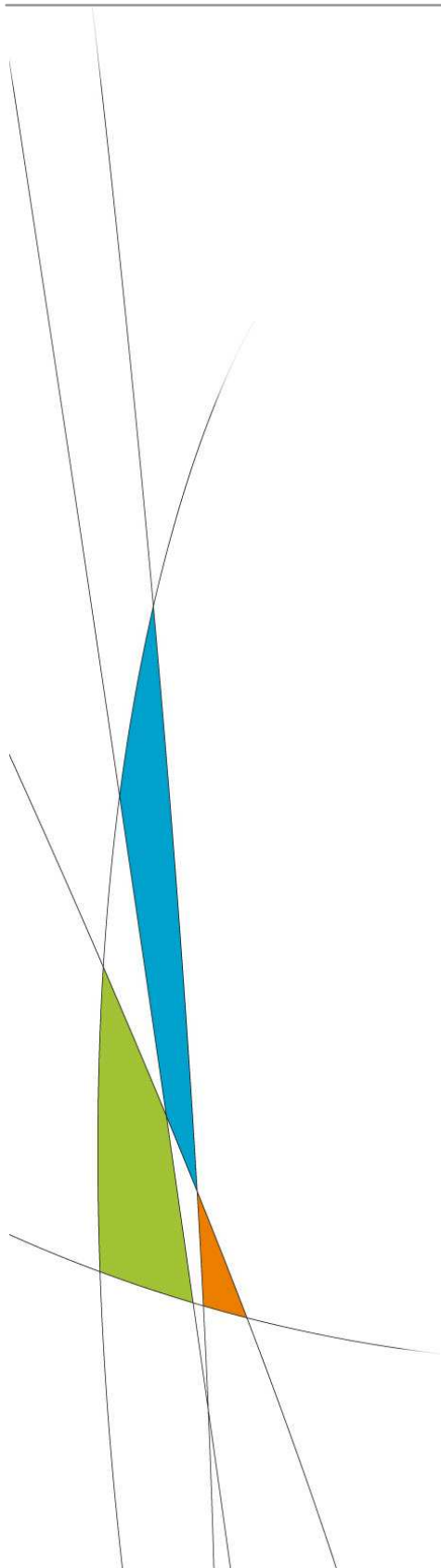
- Bader, J. C. (1994). "Modèle analogique de ruissellement à stockage de surface: test sur parcelles et extrapolation sur versant homogène." *Journal des Sciences Hydrologiques*, 39(6), 569-592.
- Baladès, J.-D., Monfort, M. and Gaber, J. (2003). "Plan de prévention des risques naturels PPR: Risques d'inondation, ruissellement péri-urbain." Ministère de l'écologie et du développement durable.
- Beasley, D. B., Huggins, L. F. and J, M. E. (1980). "ANSWERS: a model for watershed planning." *American Society for Agricultural Engineering*, 23(4), 938 - 944.
- Beven, K. and Kirkby, M. J. (1979). "A physically-based variable contributing area model of basin hydrology." *Hydrol. Sci. Bull.*, 24, 43-69.
- Cerdan, O., Le Bissonnais, Y., Govers, G., Lecomte, V., van Oost, K., Couturier, A., King, C. and Dubreuil, N. (2002). "Concentration of suspended particles in interrill flow." *Earth surface processes and landforms*, 22(2), 193-205.
- Comby, J. (1990). "La catastrophe du Grand Bornand (14 juillet 1987), composantes météorologique." *Revue de géographie de Lyon*, 65(2), 118-122.
- DAUTREBANDE, S. and COLARD, F. (2003). "Cartographie des zones à risque de ruissellement et d'érosion en région wallonne : Méthodologie et cas pilotes." *ascicule n°1 de la convention « érosion 243 », Gembloux : FUSAGx Convention réalisée au profit de la DGA (RW)*, 66 p.
- DCE Parlement Européen. (2007). "Directive 2007/60/CE du parlement européen relative à l'évaluation et la gestion des risques inondation." *Journal officiel de l'Union Européenne*.
- de Roo, A. P. J., Wesseling and RITSEMA, C. J. (1996). "LISEM: A single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage bassin. I-Theory, input and output." *Hydrological Processes*, 10, 1107-1117.
- DENEUX, M. and MARTIN, P. (2001). "Les inondations de la Somme, établir les causes et les responsabilités de ces crues, évaluer les coûts et prévenir les risques d'inondations (rapport)." *Rapport de commission d'enquête du SENAT*.
- Desbordes, M. "Principales causes d'aggravation des dommages d'inondations par ruissellement superficiel en milieu urbanisé." *Extrait de « Les dossiers des collectivités. Problèmes de l'eau, situation actuelle » sous la direction de Jean DEIT. EGP Éditeurs. Cachan, 2, 42-47.*
- Desbordes, M. (2006) "Les collectivités locales et le ruissellement pluvial"
- DUCHEMIN, M., LACHANCE, M., MORIN, G. and LAGACE, R. (2001). "Approche géomatique pour simuler l'érosion hydrique et le transport des sédiments à l'échelle des petits bassins versants." *Water Qual Res J. Canada*, 36(3), 435-473.
- Epidor. (2006). "PAPI DORDOGNE Tome I, DE LA PLUIE A L'INONDATION " *Epidor, la rivière solidaire*
- Esteves, M. and Rajot, J.-L. (1999). "Un exemple de cartographie de l'aptitude au ruissellement en région sahélienne: Sama Dey, Niger." *Hydrological Sciences Journal*, 42(2).
- Forest, G. R. and Lane, L. J. (1987). "User Requirements. USDA-Water Erosion Prediction Project. NSERL Report #1," *USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, IN*.
- Gaume, E., Livet, M., Desbordes, M. and Villeneuve, J.-P. (2004). "Hydrological analysis of the river Aude, France, flash flood on 12 and 13 November 1999." *Journal of Hydrology* 286, 135-154.
- Gaume, E., Payraste, O. and Rosa da Silva, B. (2003). "Analyse hydrologique des crues des 8 et 9 septembre 2002 dans le Gard." *Ministère de l'écologie et du développement durable*, 95p.
- GEODE. (2004). "Crue de la Seine à Paris en 1910." *Aquadoc*.
- Green, W. H. and Ampt, G. (1911). "Studies of soil physics, Part I- The flow of air and water through soils." *J. Ag. Sci.*, 4, 1-24.
- Horton. (1940). "Approach toward a physical interpretation of infiltration capacity." *Soil Sci Soc Am Proc*, 5, 339-417.

- Langlois, P. and Delahaye, D. (2002). "RuiCells, automate cellulaire pour la simulation du ruissellement de surface." *Revue Internationale de Géomatique*, 12(4), 461-487.
- Le Bissonnais, Y., Montier, C., Daroussin, J. and King D. (1998). "Cartographie de l'aléa Erosion des sols en France." *IFEN Collection Etudes et Travaux no18*.
- Le Gouée, P. and Delahaye, D. (2007). "SCALES : a large-scale assessment model of soil erosion hazard in Basse-Normandie (France)," *Geophysical Research Abstracts, Vol. 9, 11299, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2007-A-11299, European Geosciences Union 2007, Vienna, Austria, 15-20 April 2007*.
- Le Gouée, P. and Delahaye, D. (2008). "Modélisation et cartographie de l'aléa érosion des sols et des espaces de ruissellement dans le Calvados." *Rapport d'étude*.
- LRPC and CETE Normandie. (2009). "Étude bibliographique de trois méthodologies appliquées au risque érosion. Synthèse et perspectives en vue d'une cartographie départementale du risque ruissellement " *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*.
- Manus, C., Anquetin, S., Braud, I., Vandervaere, J.-P., Creutin, J.-D., Viallet, P. and Gaume, E. (2009). "A modeling approach to quantify the hydrological response of small Mediterranean catchments to the variability of soil characteristics in a context of extreme events, ." *Hydrol. and Earth Sys. Sci*, 13, 79-97.
- Mérot, P., H. Squividant, et al. (2003). "Testing a climato-topographic index for predicting wetlands distribution along an European climate gradient." *Ecological Modelling* 163(1-2): 51-71.
- Meunier, M. (1988). "Le grand Bornand: Crue torrentielle du Borne le 14 Juillet 1987." *International symposium INTERPRAVENT 1988, GRAZ*, 101-112.
- Nearing, M. A., Foster, G. R., Lane, L. J. and Finker, S. C. (1989). "A process-based soil erosion model for USDA: water erosion prediction project technology." *Transactions of ASAE*, 32(5), 1587-1593.
- Nédélec, Y. (2009). "Deux exemples d'inondation par ruissellement : quelles leçons en tirer pour une meilleure prévention." *Ingénieries Eau Agriculture Territoires, Numéro spécial "La prévention des inondations, aspects techniques et économiques des aménagements de ralentissement dynamique des crues*, 55-66.
- Philip, J. R. (1957). "The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations." *soil sci.*, 84, 257-264.
- PONSAUD, C. (2007). "Modélisation du ruissellement hivernal des sols agricoles drainées. Application du modèle STREAM sur le bassin versant de Goins." *Mémoire de Master 2 'Risques Technologiques et Naturels' ENGÉES - ULP - Cemagref*.
- Ponton. (1989). "Mission technique chargée de tirer les enseignements de la catastrophe de Nîmes du 3 octobre 1988. Rapport.-." *Paris, min. environnement*, 69p.
- Sandrine, A., Braud, I., Vannier, O., Viallet, P., Boudevillain, B., Creutin, J.-D. and Manus, C. (2009). "The use of distributed hydrological models for the Gard 2002 Flash-Flood event understanding ; Part I : Sensitivity of the hydrological response to rain fields and soil variabilities. ." *Journal of Hydrology*.
- Smith, R. E. (1981). "A kinematic model for surface mine sediment yield." *Transactions of ASAE*, 1508-1514.
- Smith, R. E. and Parlange, J. Y. (1978). "A parameter-efficient hydrologic infiltration model." *Water Resources Research*, 14(3), 533-538.
- Vigneron, S. and Guezo, B. (2006). "Les collectivités locales et le ruissellement pluvial." *CERTU, MEDD/DPPR*.
- Wischmeier, W. H. and Smith, S. D. (1978). "Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning." *USDA Handbook*.
- Woolhiser, Smith RE and DC, G. (1990). "KINEROS, A kinematic runoff and erosion model: Documentation and User Manual." *U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-77*, 130.

Résumé

Il s'agit de faire un point sur les travaux contribuant à définir et évaluer un risque d'inondation par ruissellement. A partir des travaux existants sur le ruissellement, et de réflexions complémentaires alimentées par des cas observés ou étudiés par le Cemagref en territoire rural, cette note précise les outils disponibles et les perspectives de recherches à mener pour la prévision des zones présentant de tels risques. D'autres contextes, comme la prévention des inondations par débordement de rivière ou encore la conception d'aménagements pour la maîtrise des écoulements, ne sont pas abordés dans ce document.

La note se divise en 4 parties : (1) des définitions, essentielles pour préciser la terminologie des expressions techniques utilisées (2) un état des connaissances disponibles autour du ruissellement en tant que phénomène hydrologique, (3) des réflexions sur l'identification des facteurs d'influence et des zones sensibles aux inondations par ruissellement, et (4) une synthèse des barrières qu'il nous semble nécessaire de lever pour améliorer la cartographie de l'aléa inondation par ruissellement, et éventuellement de mettre au point d'un système de prévision dédié aux risques d'inondation par ruissellement.



Direction générale
Parc de Tourvoie
BP 44 - 92163 Antony cedex
Tél. 01 40 96 61 21
Fax 01 40 96 62 25
www.cemagref.fr

