

# VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE ET DYNAMIQUE DES PLUIES DE FORTE INTENSITE A L'ORIGINE DES « CRUES RAPIDES » DANS LE BASSIN PARISIEN (FRANCE)

Johnny DOUVINET<sup>1</sup>, Olivier PLANCHON<sup>2</sup>, Olivier CANTAT<sup>1</sup>, Daniel DELAHAYE<sup>1</sup>  
et Jean-Michel CADOR<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire GEOPHEN

UMR 6554 CNRS LETG, Université de Caen Basse-Normandie  
Esplanade de la Paix  
14032 Caen Cedex 2  
[johnny.douvinet@unicaen.fr](mailto:johnny.douvinet@unicaen.fr)

<sup>2</sup> Laboratoire COSTEL

UMR 6554 CNRS, LETG, Université de Rennes 2  
Place du Recteur Henri Moal  
35043 Rennes Cedex

## Résumé

Des « *crues rapides* » sont fréquemment observées en périodes printanière et estivale (mai-août) dans les régions de grande culture du nord de la France : 269 événements, provoqués par 79 épisodes pluvieux, ont été recensés entre 1983 et 2005. A cause de leur nature torrentielle et de l'ampleur paroxysmique des dégâts associés, ces phénomènes constituent aujourd'hui la forme la plus dangereuse des inondations rencontrées dans ces régions. Cette étude s'intéresse plus spécifiquement aux conditions hydro-climatiques nécessaires à l'apparition de ces crises hydrologiques qui apparaissent dans des « *vallons secs* » dépourvus d'écoulement permanent en période normale. La démarche retenue ici repose sur une approche complémentaire : *i*) une étude descriptive de la distribution des pluies de fortes intensités à partir d'un réseau de 85 stations, en utilisant divers traitements statistiques, et *ii*) une analyse explicative par les types de circulations qui en sont à l'origine, en appliquant notamment la méthode de classification européenne de Hess-Brezowsky. Cette approche à deux niveaux d'observation doit permettre de mettre à jour l'influence des facteurs climatiques et le rôle de l'intensité des pluies dans la genèse de ces « *crues rapides* ». Elle doit également apporter des éléments de réponse sur la variabilité des pluies de forte intensité dans ces régions et fournir les prémices nécessaires au développement d'un futur système d'alerte approprié à ce type de risque.

**Mots clés :** crues rapides, pluies de fortes intensités, circulations atmosphériques, Bassin Parisien, climatologie appliquée.

## Abstract

### Spatiotemporal variability and dynamic of strong intensity rainfall at the origin of the "flash floods" in Paris Basin (France).

Some "flash floods" with high suspended content affect at the end of spring and during the summer some parts of the Paris Basin, in north-western France, causing dramatic human and property damage: 269 events have been induced by 79 high rains between 1983 and 2005. Such events are the most dangerous form of floods encountered in this area because of their torrential nature. The aim of this study is to better assess the climatic conditions required to explain the genesis of such hydrological events in dry valleys, where normally no permanent stream flows exist. Two complementary data analysis are needed: *i*) a descriptive approach permits us to better understand the spatial and temporal variability of high rainfall intensities using critical thresholds on data providing from a network of 85 climatic stations; *ii*) using the European classification of Hess-Brewowsky, a more explicative approach led to identify the preferential circulations types linked to "flash floods" event. This approach should permit us to highlight the influence of climatic controlling factors and impacts of rainfall intensities inputs on the spatial and temporal occurrence of "flash floods". Results should provide the necessary bases for a future suitable alarm system adapted to such hydrological risk.

**Key words:** flash floods, high rainfall intensities, atmospheric circulations, Paris Basin (Northern France), climatology applications.

## Introduction

Des « *crues rapides* », caractérisées par des écoulements torrentiels fortement chargés en matériaux issus de l'érosion des sols, sont fréquemment observées en périodes printanière et estivale dans les régions de grande culture du nord du Bassin Parisien (France). Ces événements hydrologiques, à la fois turbides, rapides et violents, apparaissent dans des petits bassins versants (< 40 km<sup>2</sup>) dont l'une des particularités est de ne pas toujours présenter des écoulements pérennes en période normale (Delahaye, 2002). Effectué sur la période mai-août (période de prédilection des orages les plus violents) et entre 1983 et 2005, un état des lieux réalisé sur 8 départements (Calvados, Eure, Seine-Maritime, Somme, Oise, Nord, Pas-de-Calais, Aisne) avait permis d'identifier 189 bassins versants correspondant aux entités hydrologiques situés en amont des exutoires urbanisés sinistrés (Douvinet, 2006). Des bassins ayant été touchés plusieurs fois sur la période étudiée, ce sont 269 événements qui ont été enregistrés en 23 ans, montrant à quel point ces aléas sont finalement fréquents en se plaçant à une échelle régionale.

Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes plus spécifiquement intéressés aux conditions hydro-climatiques des 79 épisodes pluvieux à l'origine des 269 « *crues rapides* » et à la dynamique des abats pluviométriques générant ce type de crues, ce qui n'a jamais fait l'objet d'étude à échelle fine dans ces régions du nord de la France. Le forçage climatique n'est pas si simple à évaluer dans ces espaces puisque tous les épisodes pluvieux de forte intensité n'entraînent pas forcément des « *crues rapides* » (Laganier *et al.*, 2000 ; Kergomard *et al.* 2002). Ces crises hydrologiques peuvent aussi apparaître à la suite de plusieurs passages pluvieux successifs (9 et 10 mai 2000, par exemple). Dans ce cas-là, plus que la hauteur d'eau quotidienne, c'est le cumul des pluies sur les jours précédents qui pourrait expliquer la genèse de ces phénomènes.

Cet article a, dès lors, pour objectif de répondre à plusieurs questions :

1) Les épisodes pluvieux liés aux « *crues rapides* » recensées sur la période de mai à août présentent-ils les mêmes caractéristiques (intensité, durée, fréquence) et une variabilité saisonnière spatialement marquée ? Si oui, ces crues printanières et estivales seraient originales, atypiques et fondamentalement distinctes des crues hivernales ; leur apparition serait directement dépendante de l'aléa pluviométrique. Si non, la pluie serait une condition nécessaire mais pas suffisante pour déclencher ces crues.

2) Quels sont les seuils pluviométriques nécessaires à l'apparition des « *crues rapides* » ? Outre la sensibilité de l'occupation du sol et l'influence de la morphologie (Douvinet, 2008 ; Douvinet *et al.*, 2009), il s'agit de vérifier dans ce travail, si une « *intensité pluviométrique minimale propice à l'apparition de ce type de phénomènes* » pourrait être détectée.

3) Les pluies de forte intensité apparaissent-elles plus fréquemment dans certains secteurs géographiques ? Pour répondre à cette question, il s'avère nécessaire d'étudier la fréquence temporelle et l'occurrence spatiale d'abats pluviométriques de diverses intensités.

4) Quelles sont les caractéristiques des situations météorologiques à l'origine des épisodes « *crues rapides* » ? Sont-elles liées à des situations particulièrement pluviogènes ? Peut-on observer des redondances dans les trajectoires des masses d'air ? A court terme, est-il possible de proposer une liste de situations pouvant donner lieu à ce type de crues ?

Afin de répondre à ces nombreuses questions, la démarche retenue repose sur une analyse à trois niveaux d'observation : *i*) identification des pluies à l'origine des « *crues rapides* » ; *ii*) mise en évidence d'un ou de plusieurs seuil(s) de déclenchement des phénomènes à échelle fine en menant une analyse descriptive de la distribution des pluies de fortes intensité à partir

d'un réseau de 85 stations ; *iii*) caractérisation et analyse explicative des types de circulations associées à ces crues à échelle régionale, en utilisant la méthode de classification européenne de Hess-Brezowsky. Structurant l'organisation de cet article, cette démarche doit permettre de déterminer l'influence des facteurs climatiques et le rôle des intensités pluviométriques dans l'apparition de tels phénomènes. Elle devrait également apporter des éléments de réponse sur la variabilité spatio-temporelle des pluies de forte intensité, et fournir les prémices nécessaires au développement d'un futur système d'alerte approprié à ce type de risque<sup>1</sup>.

## 1. Caractéristiques des pluies à l'origine des « *crues rapides* »

Les « *crues rapides* » ont été recensées à partir des dossiers « *CatNat* » à échelle régionale (Douvinet, 2006). Une zone d'étude relativement vaste a été choisie pour intégrer toutes les configurations possibles (en particulier en terme de climat) dans un milieu morphostructural relativement homogène, et pour avoir à disposition un échantillon de bassins suffisamment important pour dépasser le cadre monographique de la plupart des études menées jusqu'à présent. La période d'étude - mai-août - s'est focalisée sur les quatre mois de l'année au cours desquels les orages sont considérés comme les plus virulents (Escourrou, 1978 ; Lherminez, 1998 ; Météo France, 2005). Des crues peuvent survenir de manière précoce (21 avril 1991) ou plus tardive (1<sup>er</sup> septembre 1987 ; 6 décembre 1999) mais ces phénomènes sont très rarement observés en dehors de mai-août. A notre connaissance, 3 événements ont été observés à la fin du mois d'avril et 7 au début du mois de septembre ; ces données ne représentent que 3,7 % des 269 événements recensés, ce qui justifie leur exclusion.

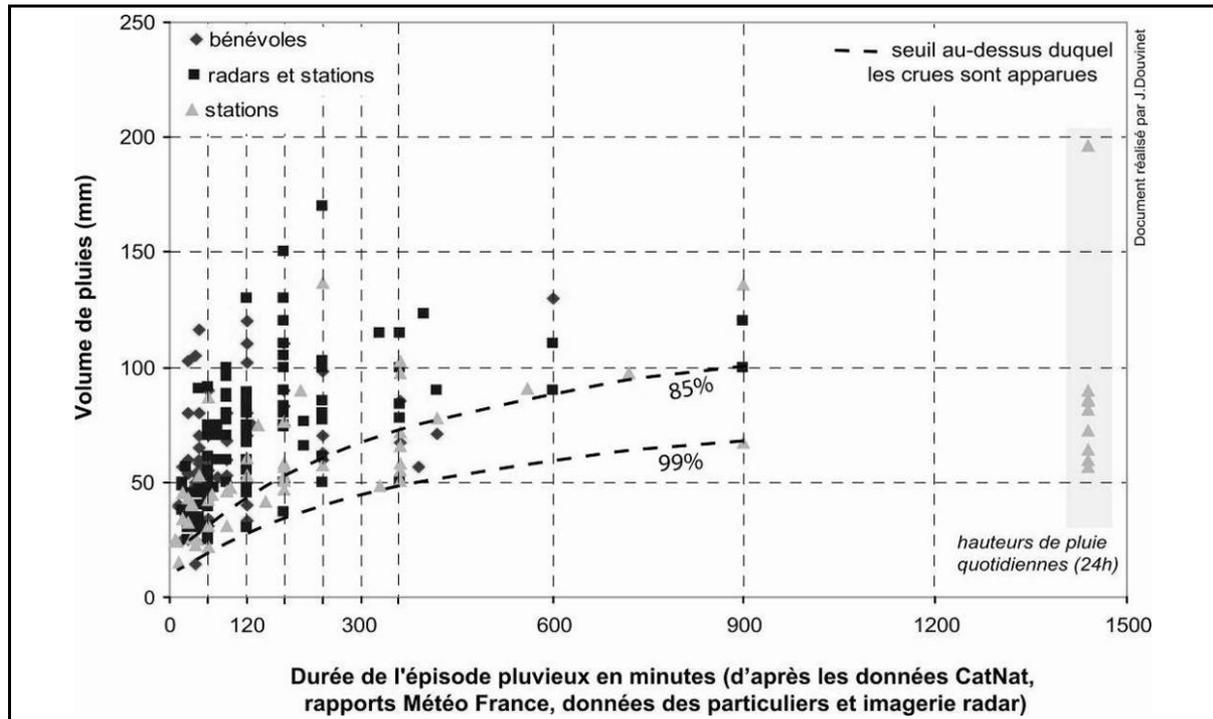
L'accès aux dossiers « *CatNat* » a permis de connaître le volume et la durée des épisodes pluvieux à l'origine des « *crues rapides* ». Le rapport météorologique, rédigé par des experts de Météo France, est établi à partir de plusieurs données : les mesures horaires venant des stations du réseau officiel et situées le plus près possible des zones touchées ; les échos-radars (utilisés depuis 1986 et affinés à l'échelle du km<sup>2</sup> depuis 2000) ; les données des bénévoles, même si on peut émettre des réserves quant à la fiabilité de ces informations (Douvinet, 2006). L'expert a ensuite pour mission de statuer sur le seuil de reconnaissance en croisant les différentes données disponibles. Pour que l'état de « *catastrophe naturelle* » soit reconnu, l'intensité des pluies doit être supérieure à la valeur décennale (MEDD, 2005). La décision repose le plus souvent sur les courbes *Intensités / Durées / Fréquences* (courbes IDF) des stations du réseau officiel. Dans le cadre de cette étude, une *valeur moyenne* a été retenue à l'échelle des bassins étudiés, en faisant une interpolation spatiale entre les données radar et en utilisant les relevés des stations lorsque celles-ci se situaient au sein des bassins (figure 1).

### 1.1. Des cumuls de pluies élevés (> 50 mm) sur de courtes durées (< 15 h)

Contrairement aux idées reçues, les pluies à l'origine des « *crues rapides* » survenues dans les régions du nord de la France sont « *extrêmes* » au sens défini par Muller (2006). Les pluies

<sup>1</sup> Plusieurs études ont déjà été menées en France pour répondre à des problématiques communes à ce travail. Le *Programme MAP (Alpin Méso-Echelle)* tente d'améliorer la prévision des pluies intenses dans le temps et dans l'espace sur les Alpes afin de pouvoir donner l'alerte de manière efficace (Bourgeault *et al* 2001 ; Pradier, 2002). Le projet *HERA (HEavy pReCipitation in the Alpine region)* a pour but d'estimer les chutes de pluie sur le massif alpin pour pouvoir anticiper le risque éventuel d'inondation (Volkert, 2000). D'autres projets tentent de relier les pluies intenses et les crues éclaircies en région de moyenne montagne méditerranéenne. Le Projet *MEDEX (MEDiterranean EXperiment)* fédère la communauté météorologique sur les épisodes pluvieux à forts impacts sociétaux tels que sécheresses, inondations, mouvements de terrain (Jansa *et al.*, 2007). On peut aussi citer le programme *CYPRIM (CYclogenèses et PRéCipitations Intenses en région Méditerranéenne)* qui s'intéresse à la formation et au développement des masses d'air convectives (Anquetin *et al.*, 2003). Des progrès sensibles sont attendus dans la mise en place d'un système d'alerte à l'échelle internationale avec le programme *THORPEX* (Bourgeault *et al*, 2001, 2002). L'étude la plus proche de nos thématiques est le projet *COPS (Convective and Orographically-induced Precipitation Study)* qui porte sur les masses d'air en déplacement et sur les mécanismes de formation des pluies orageuses sur les Vosges et la Forêt-Noire. Les résultats de ce programme, lancé en 2007, sont attendus pour fin 2009...

cumulées varient entre 50 et 200 mm sur un pas de temps de quelques heures seulement. Dans 80% des 269 événements, les précipitations sont supérieures à 40 mm. Les stations du réseau Météo France arrivent parfois à mesurer des intensités remarquables (figure 1) : 78,9 mm ont été mesurés en 1 h par la station de Deauville (Calvados) le 1<sup>er</sup> juin 2003, ce qui donne même un cumul de 127,8 mm mesurés en 15 h glissantes (de 03:00 à 18:00 UTC) si on y associe les pluies antécédentes. On peut également mentionner d'autres intensités : 24 mm en 8 minutes relevés à Ault (Somme) le 11 juin 1997 ; 52,8 mm en 45 minutes à Nouy-en-Thelle (Oise) le 25 août 1990 ; 89,8 mm mesurés en 3 h 26 à la station de Jaméricourt (Oise) le 2 juillet 1993 ; 196 mm cumulés entre le 6 et 7 juillet 2001 à Rouvroy en Santerre (Somme), etc.



**Figure 1** : Cumuls et durées des épisodes pluvieux à l'origine des « crues rapides » recensées (1983-2005). Les seuils indiquent la part des crues observées au-dessus de ces deux intensités. *Time-duration and cumulative rains linked to « flash floods » registered from 1983 to 2005. The thresholds indicate parts of events observed in upstream of such values.*

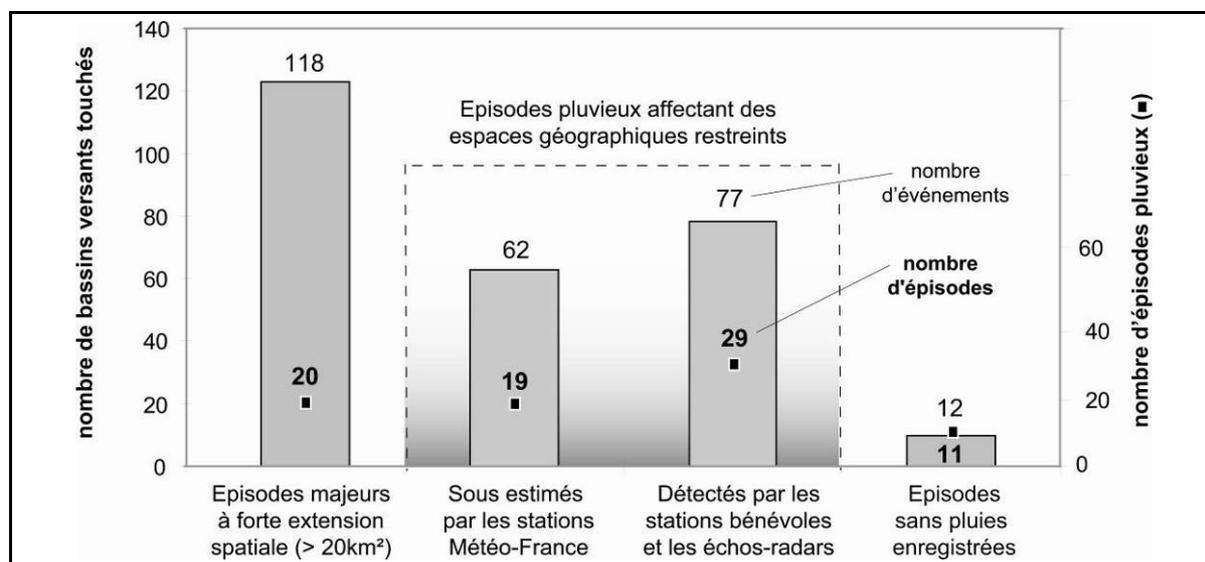
Les stations Météo France ne se situent pas toujours sous les épices les plus arrosés. Il est souvent indispensable de recourir aux images radar pour affiner les valeurs sur des pas de temps plus fins. Les lames d'eau estimées des stations ARAMIS, disponibles sur une maille de 10 km<sup>2</sup> depuis 1986, et affinés à l'échelle du km<sup>2</sup> depuis 2000, améliorent considérablement la spatialisation des pluies à l'origine des « crues rapides », même si elles ne sont pas utilisées sur toute la période d'étude (1983-2005). En revanche, si les relevés des bénévoles indiquent les intensités les plus « extrêmes » : 48 mm en 40 minutes le 24 juin 1983 ; 103 mm en 30 minutes le 18 mai 1993 ; 64 mm en 4 h le 21 août 2001..., ces données ne sont pas validées.

Au final, le graphique combine des cumuls provenant de différentes sources (les données radar gardant la meilleure représentativité spatiale) et mentionnés sur différents pas de temps.

## 1.2. Deux types d'épisodes pluvieux distincts

Il convient de bien distinguer les phénomènes pluviométriques affectant de grands espaces géographiques (disposition linéaire associée aux passages de fronts froids actifs par exemple)

et les épisodes localisés sur des espaces restreints (disposition concentrique des pluies liées à des phénomènes stochastiques ou à des facteurs locaux, transformant le potentiel instable en averses / en orages). Une typologie (figure 2) peut être proposée sur les 79 épisodes pluvieux à l'origine des événements « *crues rapides* ».



**Figure 2** : Typologie des 79 épisodes pluvieux à l'origine des « crues rapides » (1983-2005) en fonction de leur intensité et leur extension spatiale. *Rainfall events typology according to their intensity and spatial extends.*

On peut ainsi différencier :

- **20 épisodes majeurs à forte extension spatiale** (> 20 km<sup>2</sup>) détectés par les postes du réseau Météo France et par les stations des bénévoles. Des cumuls de pluies supérieures à 60 mm ont été à l'origine de 118 événements, ce qui représente 44% des 269 crues recensées. Ces épisodes présentent une grande extension géographique, ce qui explique qu'ils soient à la fois détectés par les postes pluviométriques, et que le nombre de bassins versants touchés soit plus élevé, avec une moyenne de 5,9 bassins par épisode.

- **48 épisodes pluvieux affectant des espaces géographiques plus localisés.** On peut subdiviser cette catégorie en deux sous-groupes : certains épisodes matérialisés sur les images radar, mais sous-estimés par les stations officielles (19) ; les autres uniquement détectés par les stations des bénévoles tout en étant confirmés par les échos radars (29). Ces épisodes sont ponctuels, de courte durée, et ils présentent une faible extension géographique sans réelle organisation spatiale. Les intensités peuvent être très élevées : 34 mm en 15 minutes mesurés à Monthiers (Aisne) le 29 août 2003, par exemple. Si le nombre total d'événements (139 crues) est plus important, le nombre de bassins touchés par épisode (2,9 en moyenne) est plus faible que dans les cas précédents.

- 12 crues liées à **11 épisodes sans pluies enregistrées, exclues de cette typologie** car aucune donnée n'a été recueillie dans les dossiers « *CatNat* » (figure 2).

Les « *crues rapides* » sont finalement associées à deux types d'épisodes dont les cumuls, les durées et l'extension spatiale sont très variables. Les épisodes majeurs à forte extension géographique correspondent à ce que Muller (2006) appelle des EPS pour Episodes Précipitants Significatifs. Même si la distribution du réseau de mesure est assez lâche, l'extension spatiale de l'épisode est suffisamment importante pour que celui-ci soit enregistré par une ou plusieurs stations relativement éloignées entre elles. Les épisodes qui touchent des espaces restreints nécessitent, à l'inverse, un réseau de mesures plus dense et à des échelles

plus fines puisque la station ne va pas forcément se situer sous l'épicentre pluvieux. Aux échelles fines, seules les données radar du projet PANTHERE, acronyme de *Projet Aramis Nouvelles Technologies en Hydrométéorologie, extension et renouvellement*, offriraient des potentiels mais ces données, existant depuis 2006, sont trop récentes pour notre étude (Delrieu, 2004). On propose alors de mieux appréhender les logiques spatiales et temporelles des pluies de forte intensité en menant une analyse à deux échelles : à l'échelle régionale tout d'abord, en choisissant un réseau de stations sur l'ensemble de la zone d'étude ; à échelle synoptique ensuite, en travaillant sur les caractéristiques des situations atmosphériques et des types de circulations observées le jour  $j$  et les jours qui précèdent la date de recensement des « crues ».

## 2. Précipitations de forte intensité et « crues rapides » associées

La dynamique spatiale et temporelle des pluies de forte intensité a été étudiée de manière descriptive en menant une analyse comparative sur un semis de 85 stations choisies à partir du réseau Météo France. Les résultats obtenus ont ensuite été comparés aux 79 épisodes pluvieux ayant conduit aux 269 événements « crues rapides » sur la période 1983-2005. On souhaite ici savoir si un ou plusieurs seuil(s) de déclenchement des phénomènes peuvent être détectés à échelle fine.

Le fait de choisir une couverture régionale a pour objectif principal de privilégier une approche spatiale comparative (figure 3) grâce à la disponibilité d'un grand nombre de postes pluviométriques pérennes sur la période étudiée et offrant une bonne représentativité géographique. En parallèle, les données horaires ont été analysées pour certains épisodes mais le nombre de stations n'était pas assez élevé pour permettre une couverture homogène à l'échelle régionale. L'intérêt de cette étude porte avant tout sur l'analyse temporelle des données ; sur le plan spatial, le choix des postes n'a pas toujours été facile, notamment sur les marges de la zone d'étude (Calvados, Nord).

### 2.1. Choix et limites des données

Un premier tri a permis de sélectionner 253 postes dont les données sont disponibles sur la période 1983-2005 (période similaire à l'inventaire initial des « crues rapides »). Certaines stations ont été supprimées de cet échantillon lorsque plus de 30% des données journalières manquaient. Au final, 85 stations ont été retenues en s'adaptant au mieux à la forme, à la taille et au relief des départements. Le découpage par la méthode des polygones de Thiessen confirme que la distribution est homogène entre les postes, ces derniers couvrant en moyenne une surface de 588 km<sup>2</sup>. La fiabilité des données a été vérifiée sur les 85 stations (figure 3), conformément à la méthode préconisée par A. Muller (2006). Les résultats sont les suivants :

- 51 stations (60%) ne présentent aucune coupure dans leur série de données ;
- 65 stations ont plus de 99,5% de données ;
- 79 stations (86%) ont un nombre de données supérieur à 98%.

La station d'Auffay (fermée depuis le 31 décembre 2001), dont la série de données est la plus incomplète (83%), a été gardée car, paradoxalement, c'est la plus représentative pour le département de la Seine-Maritime (Delahaye, 2002).

L'utilisation des relevés quotidiens peut en partie être remise en question. En effet, l'hétérogénéité des pluies de forte intensité peut être très importante même si on reste sur de courtes distances (Doswell *et al.*, 1996). Lorsque toute la hauteur d'eau est bien captée par une station, elle ne renseigne pas sur l'intensité de l'épisode orageux, variable pourtant fondamentale pour tenter d'expliquer la cinématique de la crue (Lambert, 1996 ; Delahaye, 2002).

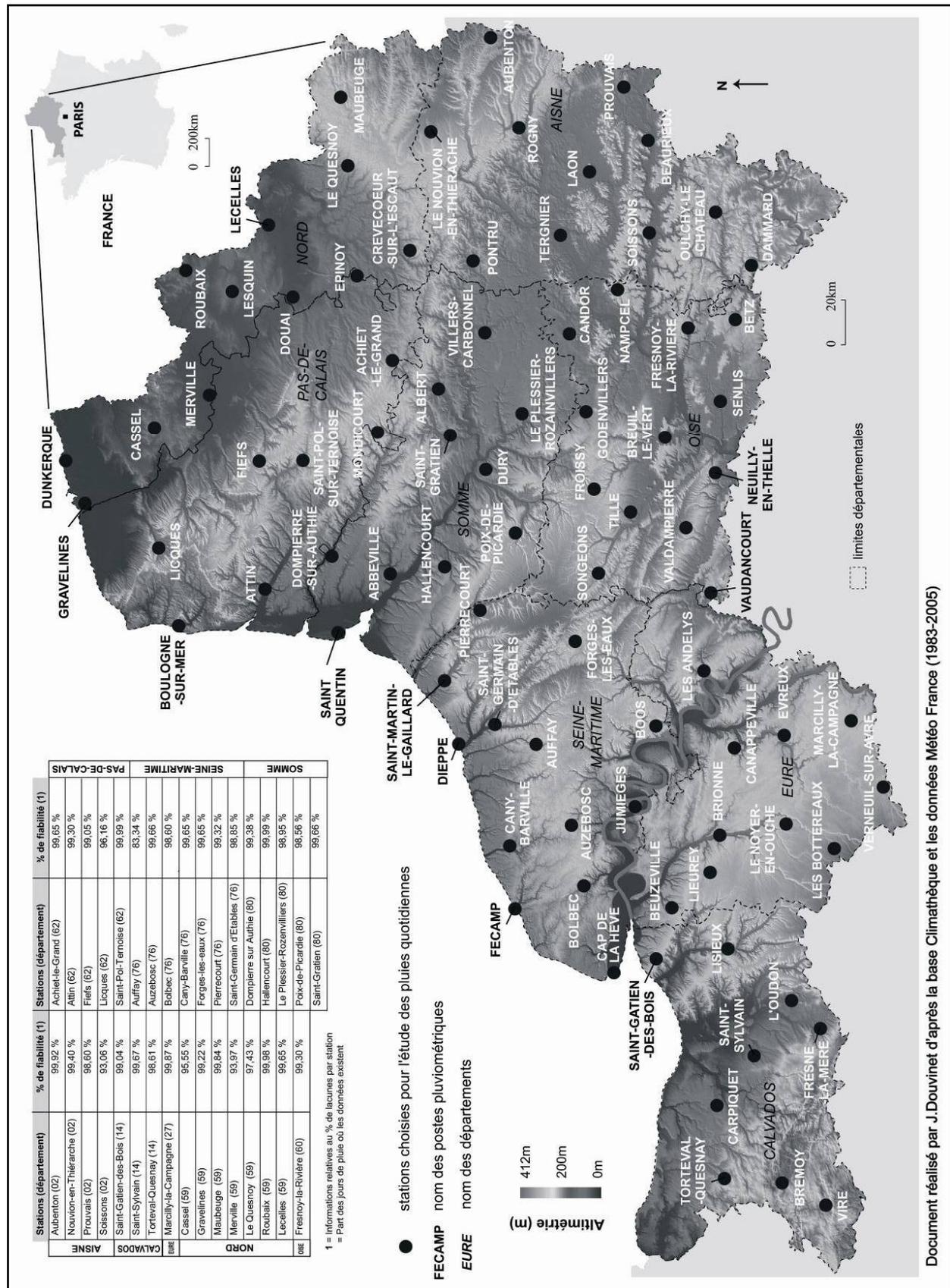


Figure 3 : Localisation, nom et fiabilité des 33 postes pluviométriques pour lesquels les séries ne sont pas complètes (1983-2005). Geographical distribution, name and the percent of valid data on the 33 stations for which daily cumulative rains are not entirely present (1983-2005).

Le relevé journalier des pluviomètres a toujours lieu à 6 h UTC (soit 8 h locales) et un tel découpage peut scinder un épisode pluvieux en deux (6-7 juillet 2001 ; 31 mai - 1<sup>er</sup> juin 2003). Enfin, la période d'étude (1983-2005) est légèrement plus courte qu'une normale climatique définie sur 30 ans.

C'est en ayant connaissance de ces contraintes et limites d'utilisation que cette étude a été menée. Une comparaison des résultats obtenus sur les stations avec la base de données « *crues rapides* », sur la période 1983-2005, doit permettre de définir l'efficacité hydrologique des pluies de forte intensité et de quantifier l'influence des facteurs indirects, notamment celle des antécédents climatiques dans la phase de « *préparation* » des crues.

## 2.2. Relation entre les maxima et les « *crues rapides* » (1983-2005)

### 2.2.1. Fréquence et cartographie des maxima selon les trois premiers rangs

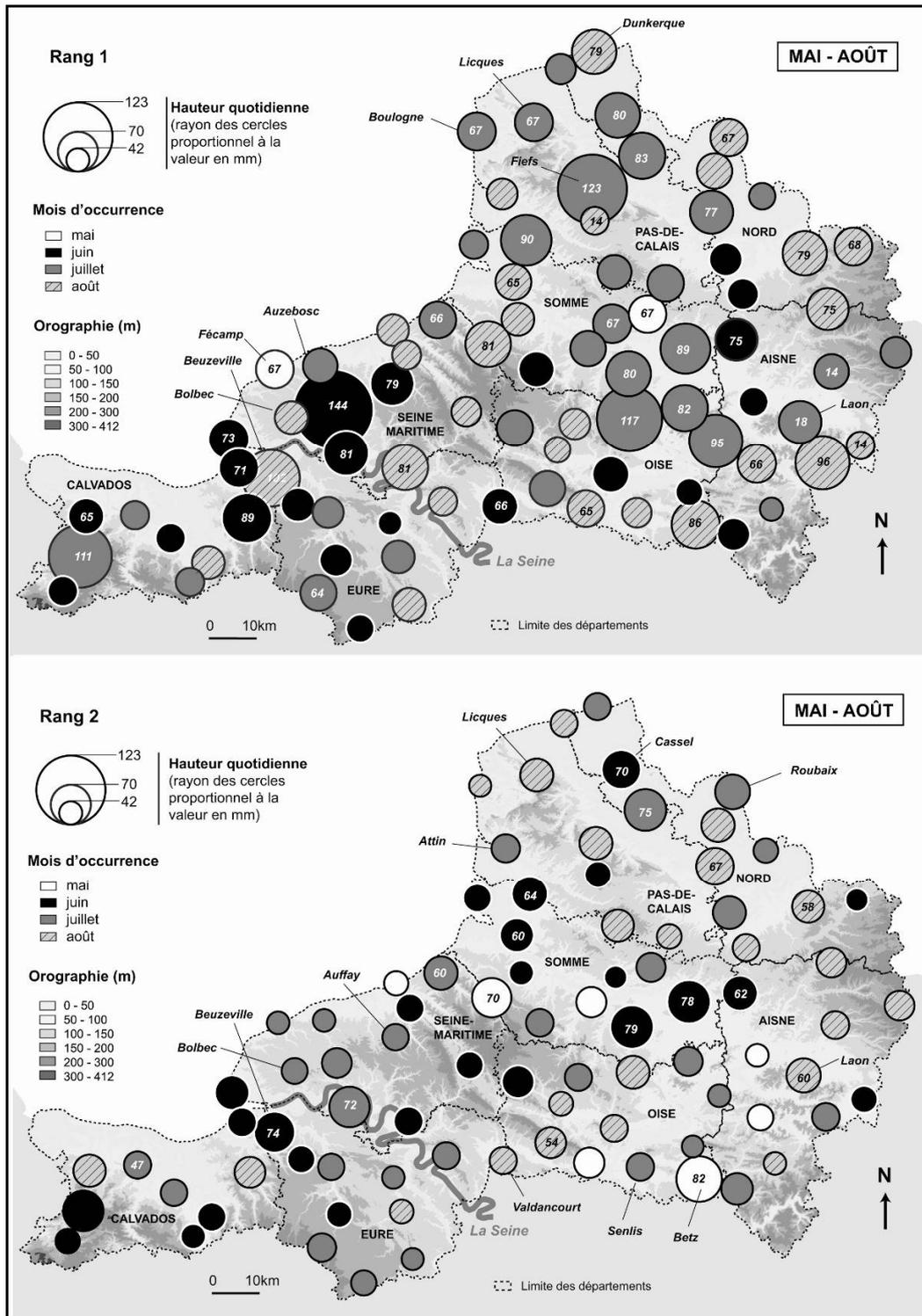
La distribution spatiale et temporelle des hauteurs d'eau quotidiennes les plus importantes a été étudiée en distinguant les valeurs de rang 1 (correspondant au record pluviométrique), de rang 2 (deuxième valeur après ce maxima) puis rang 3 (troisième valeur). Les maxima de rang 1 correspondent aux valeurs extrêmes les plus importantes relevées entre mai et août inclus et au cours de la période 1983-2005 sur les 85 stations choisies pour cette étude.

La carte met à jour plusieurs disparités et donne une première idée de l'organisation géographique des extrêmes (figure 4a). La station dans laquelle a été enregistré le maxima de rang 1 le plus faible (42 mm) est Oulchy-le-Château (Aisne) tandis que la valeur la plus élevée (144 mm) a été enregistrée à Auzebosc (Seine-Maritime) le 16 juin 1997. Les écarts sont parfois importants entre deux stations situées à une dizaine de kilomètres l'une de l'autre. Toutefois, la répartition spatiale des maxima reste similaire à la distribution moyenne annuelle des pluies. Le Pays d'Auge, le Pays de Caux, les collines de l'Artois, le Pays de Thelle et le Soissonnais, régions annuellement les plus arrosées, ont des maxima plus élevés que le sud-est de la Seine-Maritime, l'intérieur de la Somme ou la partie centrale de l'Eure.

**Un gradient spatial est observé** : les maxima sont plus souvent recensés en juin à l'ouest de la zone d'étude (Calvados, Eure, Seine-Maritime) ; en juillet pour une partie centrale (Oise, Somme, Pas-de-Calais, Aisne) et de manière plus aléatoire au mois d'août. Cette distribution est largement nuancée par plusieurs exceptions et la relation est loin d'être systématique. Il faut également souligner que les maxima sont très peu recensés durant le mois de mai.

Les maxima de rang 2 (hauteur de pluie venant après les maxima de rang 1) ont également été recensés. Cela permet de s'affranchir des effets des artefacts de mesures sur les rangs 1 et des éventuels caractères exceptionnels des rangs 1. Les maxima du rang 1 présentent un caractère très aléatoire qui ne peut être représentatif d'un secteur géographique donné car ils sont liés au « *hasard* » de la localisation de l'épicentre pluviogène, sans compter également sur un possible dysfonctionnement instrumental<sup>2</sup> lors d'épisodes intenses, d'autant plus s'ils sont à caractère orageux (Bigot, 2001 ; Moisselin *et al.*, 2002 ; Cantat, 2003). La carte (figure 4b) montre que les rangs 2 sont plus fréquents au cours des mois de juin et de juillet dans la partie ouest (Eure, Seine-Maritime) ; en juillet et août dans la partie orientale (Oise, Somme, Pas-de-Calais). Cette fois-ci, on observe un décalage vers l'est par rapport à la première carte (figure 4a). Les maxima recensés en mai restent aléatoires et peu nombreux.

<sup>2</sup> La validation scientifique des séries temporelles est un préalable fondamental pour établir une recherche objective à partir des bases de données climatiques fournies par divers organismes. La présence d'une valeur « *aberrante* » peut s'expliquer, en partie, par des problèmes techniques dans la chaîne d'acquisition des données. Il existe quatre phases durant lesquelles peut survenir le « *parasitage* » de la série : lors de la mesure, lors de la transmission, lors du stockage et/ou lors du traitement des données. L'ensemble des travaux effectués à ce sujet met en évidence le rôle essentiel du stade de la mesure pour expliquer les discontinuités temporelles (Alexanderson, 1986 ; Heino, 1996 ; Mestre, 2000 ; Moisselin *et al.*, 2002 ; Cantat, 2003).



**Figure 4 :** Occurrence spatio-temporelle des maxima mesurés sur les 85 stations entre 1983 et 2005 pour les rangs 1 et les rangs 2. *Spatial and temporal occurrence of the maximum values of 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> orders registered on the 85 stations (1983-2005).*

**2.2.2. Liens avec les « crues rapides » recensées**

Les dates des 79 épisodes pluvieux à l’origine des « crues rapides » recensées entre 1983 et 2005 ont été confrontées aux maxima enregistrés par les 85 stations pour connaître la part des catastrophes liées à des pluies remarquables mesurées par un réseau relativement lâche.

Les premières analyses donnent des résultats majeurs : 25% des rangs 1 correspondent à des épisodes « *crues rapides* ». Le pourcentage d'épisodes identifiés tend même à s'accroître progressivement en intégrant les dates des maxima de rang 2 (41%) et de rang 3 (47%). Au final, après avoir supprimé les doublons entre maxima, ce sont 37 épisodes « *crues rapides* » qui sont associés à des maxima relevés par une des 85 stations (tableau 1). Ce résultat signifie que près de la moitié des crues sont liées à des abats d'eau remarquables détectés par ce semis de stations relativement bien distribuées à l'échelle régionale.

MAXIMA	20 épisodes à forte extension spatiale	48 épisodes à extension spatiale réduite		11 épisodes dont les pluies sont inconnues	Pourcentage d'épisodes détectés
		détectés par le réseau officiel de Météo France	mesurés par les radars et les stations bénévoles		
rang 1	13	2	4	1	20 (25 %)
rang 2	8	3	7	2	20 (25 %)
rang 3	7	2	5	1	15 (19 %)
rangs 1 + 2	15 *	5	10	2	32 (41 %)
total (%)	15 (75 %)	6 (32 %)	14 (48 %)	2 (18 %)	37 (47 %)

\* total après extraction des doublons (des dates sont en effet communes aux rangs 1, 2 et 3 sur plusieurs stations)

**Tableau 1** : Episodes « *crues rapides* » associés à des maxima relevés sur une des 85 stations (1983-2005). « *Flash flood* » events linked to maxima measured on one of the 85 stations.

Les écarts entre les maxima et les épisodes de « *crues rapides* » peuvent s'expliquer par la distribution du réseau et par l'éloignement des stations par rapport aux épices les plus pluvieuses. On remarque surtout une « *surreprésentation* » des épisodes à forte extension spatiale. Lorsque deux stations suffisamment éloignées enregistrent leur maxima à la même date, on peut considérer que cet épisode correspond à un Evénement Précipitant Significatif (Anquetin *et al.*, 2003 ; Muller, 2006). En analysant les dates des maxima, on observe que 59% des maxima de rang 1, 52% des maxima de rang 2, et 45% des maxima de rang 3, correspondent à des EPS. Bon nombre de maxima sont donc associés à des épisodes à forte étendue spatiale, ces derniers ayant une couverture spatiale supérieure à quelques dizaines de kilomètres carrés. Par ailleurs, ces systèmes de plus grande ampleur géographique ont pour conséquence de masquer des épisodes locaux dont l'intensité est légèrement plus faible.

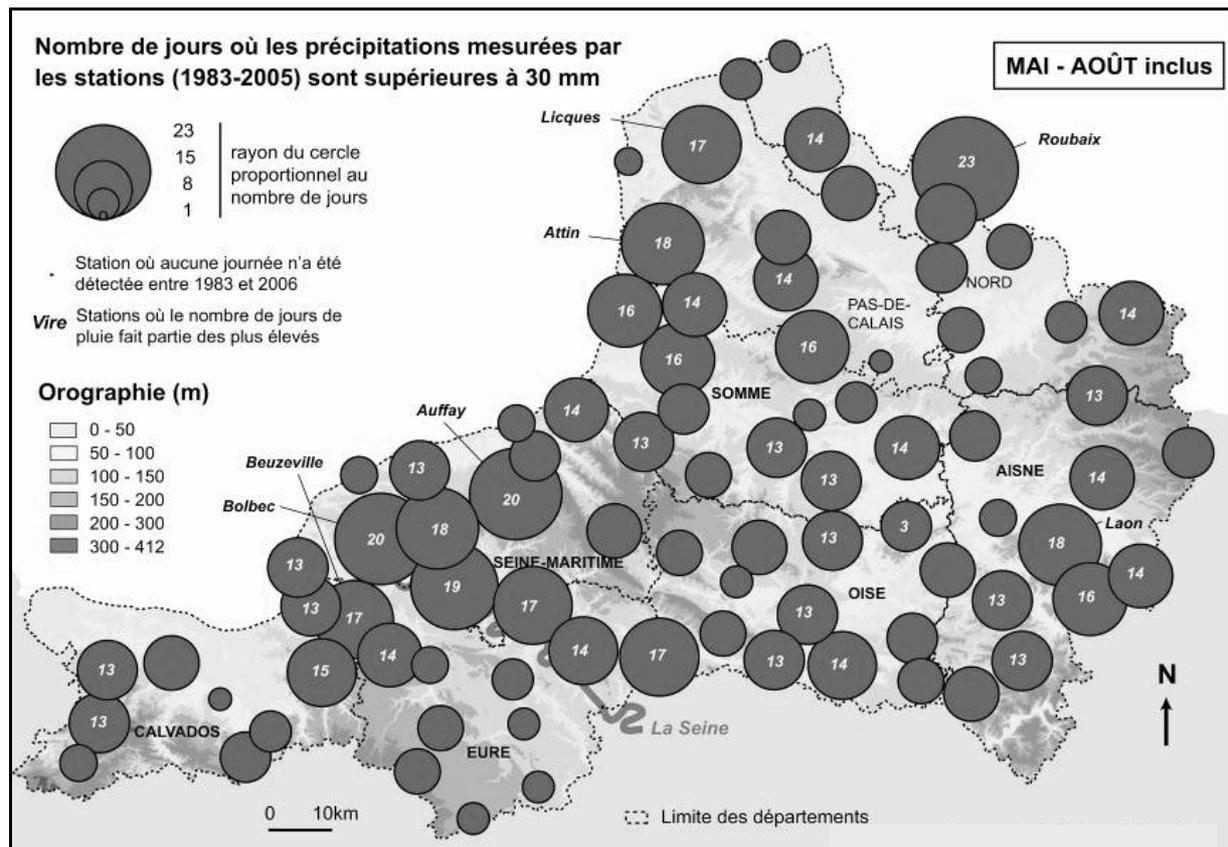
A la lecture de ces résultats, on propose de mener une seconde étude, dite « *par seuil* », afin de voir si la part des épisodes à l'origine des « *crues rapides* » recensées augmente quand on travaille cette fois-ci sur différents seuils d'intensités pluviométriques.

### 2.3. Relation entre différents seuils pluviométriques et les « *crues rapides* » (1983-2005)

#### 2.3.1. Distribution spatiale et temporelle des pluies supérieures à différents seuils

Le nombre de jours où des pluies mesurées par le réseau de 85 stations (1983-2005) sont supérieures à des seuils donnés a été comptabilisé suivant la méthode d'échantillonnage dite « *sup-seuil* » (Wotling, 1998). Les seuils retenus ont été fixés à 30, 40 et 50 mm pour prendre en compte, de manière implicite, l'éloignement des stations par rapport aux zones touchées ou à des zones pluvieuses très pluvieuses, et voir quelle est la représentativité de ces seuils par rapport aux 79 épisodes « *crues rapides* » recensés. Les jours avec des pluies supérieures à 30 mm, cumulés sur les 85 stations, entre mai et août et durant la période 1983-2005 (figure 5), mettent en avant un gradient spatial inattendu.

Certains secteurs géographiques sont sensibles, en particulier le Pays de Caux, le Pays d'Auge, la vallée de la Seine, le Nord, l'est de l'Aisne et les collines de l'Artois. D'autres secteurs semblent, en revanche, moins pluvieux : le sud de l'Eure, la partie nord-ouest de l'Oise et le Santerre.



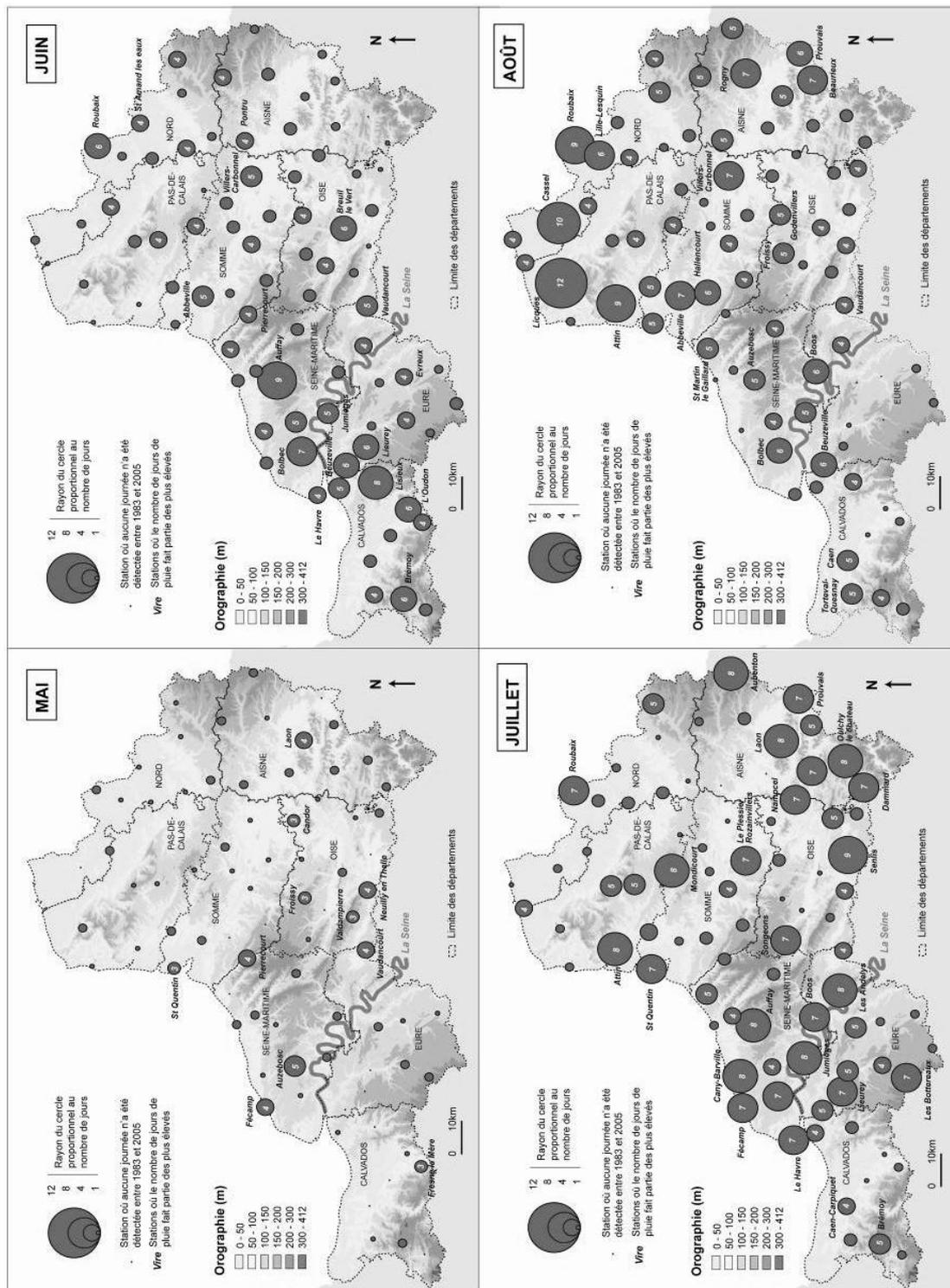
**Figure 5 :** Nombre de jours où des pluies supérieures à 30 mm ont été mesurées (1983-2005) sur les 85 stations. *Daily rains up to 30 mm measured by one of the 85 stations.*

A l'échelle mensuelle (figure 6), des différences importantes s'observent :

- mai : le nombre de jours de pluies (> à 30 mm) est très faible sur l'ensemble de la zone ;
- juin : la plupart des stations mesure au moins un jour avec des pluies supérieures à 30 mm ; c'est la partie occidentale qui semble la plus sensible (Pays d'Auge, Pays de Caux) ;
- juillet : on remarque un certain décalage vers l'est ; les disparités sont marquées entre les secteurs où le nombre de jours de pluie > 30 mm est important (Pays de Caux, Artois, vallée de la Seine, vallée de l'Oise et vallée de la Marne) et le reste de la zone d'étude ;
- août : le nombre de jours de pluie > 30 mm redevient élevé sur bon nombre de stations ; la marge septentrionale, et secondairement la partie orientale, sont les plus sensibles.

Les jours où les précipitations sont supérieures à 30 mm sont rarement observés au cours du mois de mai. Par contre, on observe, entre juin et août, un gradient spatial d'ouest en est, qui avait déjà été pressenti en analysant la distribution des maxima. Les jours où les pluies sont supérieures à 30 mm deviennent nombreux à partir de juin. Cette observation matérialise en fait le début de l'« été » d'un point de vue climatique, avec l'arrivée par l'ouest des masses d'air instables et des situations de marais barométriques, propices aux averses et aux orages. L'influence du réchauffement du sol favorise le mouvement ascendant des masses d'air dès qu'une poche d'air froid stationne en altitude (Pédelaborde, 1957). Un décalage s'opère au fur et à mesure vers la partie orientale en juillet (Pas-de-Calais, Aisne), et vers le nord et l'est en août (Nord, Aisne). Ce gradient spatial n'est pas exclusif : des passages orageux peuvent, ponctuellement, être détectés par les stations sur la totalité de la période étudiée.

Ces résultats ont ensuite été confrontés avec les épisodes « *crues rapides* » pour savoir si cette méthode, dite « *par seuil* », améliore la part des catastrophes détectées.



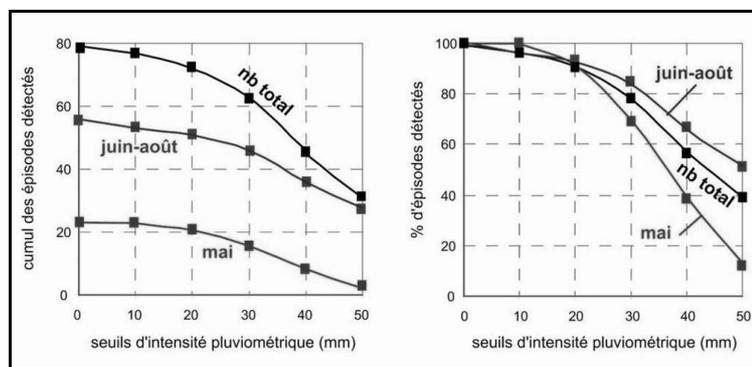
**Figure 6 :** Nombre de jours où les hauteurs quotidiennes mesurées par les 85 stations (1983-2005) sont supérieures à 30 mm entre les mois de mai et août inclus. *Daily rains up to 30 mm measured by one of the 85 stations (1983-2005) from May to August.*

### 2.3.2. Liens entre les seuils pluviométriques et la part des « crues rapides » retrouvées

En abaissant progressivement les seuils, on retrouve la quasi-totalité des épisodes « crues rapides » : 32 épisodes (40%) sont détectés lorsqu'on fixe le seuil à 50 mm ; 57% au dessus de 40 mm ; 78% à 30 mm ; 91% à 20 mm, puis 96% à 10 mm. Des différences importantes sont observées à l'échelle mensuelle (figure 7). Les épisodes qui ont eu lieu en juillet (63%),

en août (56%) et en juin (43%) sont plus facilement détectés par le seuil fixé à 50 mm que ceux qui ont été observés au cours du mois de mai : 3 épisodes sur 23, soit 13% seulement. Il faut abaisser le seuil à 30 mm pour obtenir une meilleure représentativité du réseau et détecter 70% des épisodes « *crues rapides* » recensés en mai. Ces résultats nous amènent à penser que le seuil de 30 mm serait suffisamment représentatif pour pouvoir être considéré comme une *averse extrême caractéristique*, ou ERT (« *Extreme Rainfall Threshold* »), pour laquelle une « *crue rapide* » peut potentiellement apparaître dans ces régions.

**Figure 7** : Pourcentage d'épisodes détectés en fonction des seuils d'intensité choisis sur les 85 stations. *Part of rainfall days linked to « flash floods » for various intensities according to the 85 stations network.*



Dans un second cas, afin d'évaluer le rôle de l'intensité des pluies dans le déclenchement des « *crues rapides* », le nombre de jours avec une pluie supérieure aux différents seuils a été totalisé sur les 85 stations. Sur les 72 épisodes identifiés avec une pluie > 50 mm (tableau 2), 32 épisodes coïncident avec des « *crues rapides* », ce qui représente 40% de l'échantillon.

MOIS	A	B	C (C/A)	D = A - C (A/C)	E = B - C (B/C)
	69 épisodes "crues rapides"	nb jours de pluies > 50 mm (stations)	épisodes > 50 mm avec crues rapides	pluies < 50mm avec crues rapides	pluies > 50mm sans crues rapides
mai	23	4	3 (13 %)	20 (87 %)	1 (25 %)
juin	24	20	10 (42 %)	14 (58 %)	10 (50 %)
juillet	16	23	10 (63 %)	6 (37 %)	13 (56 %)
août	16	25	9 (56 %)	7 (44 %)	16 (64 %)
total	79	72	32 (40 %)	47 (60 %)	40 (60 %)

**Tableau 2** : Episodes pluvieux avec ou sans « *crues rapides* » détectés pour le seuil 50 mm. *Rains events with or without « flash floods » detected with the 50 mm threshold.*

Autrement dit, 60% des pluies > à 50 mm mesurés sur au moins une des 85 stations ne sont pas associées à ce type d'événement... De telles intensités sont rarement mesurées au mois de mai, ce qui suggère que les épisodes sont liés à des pluies beaucoup plus faibles. Le nombre de jours avec une pluie supérieure à 30 mm a également été comptabilisé. Sur les 285 jours identifiés, 62 épisodes (ou 22%) sont liés à des « *crues rapides* » ; 78% des pluies > 30 mm ne sont donc pas associées à ce type de phénomène (tableau 3). Finalement, l'intensité des pluies n'est pas la seule variable pouvant expliquer la genèse de ces « *crues rapides* ».

MOIS	A	B	C (C/A)	D = A - C (A/C)	E = B - C (B/C)
	Nb épisodes "crues rapides"	Nb jours de pluies > 30 mm (stations)	épisodes > 30 mm avec crues rapides	pluies < 30mm avec crues rapides	pluies > 30mm sans crues rapides
mai	23	54	15 (65 %)	8 (35 %)	39 (72 %)
juin	24	64	20 (83 %)	4 (17 %)	44 (68 %)
juillet	16	82	13 (81 %)	3 (19 %)	69 (84 %)
août	16	85	14 (87 %)	2 (13 %)	71 (84 %)
total	79	285	62 (78 %)	17 (22 %)	223 (78 %)

**Tableau 3** : Episodes pluvieux avec ou sans « *crues rapides* » détectés pour le seuil 30 mm. *Rains events with or without « flash floods » detected with the 30 mm threshold.*

### 2.3.3. Poids des antécédents hydro-climatiques pour les « crues rapides » du mois de mai

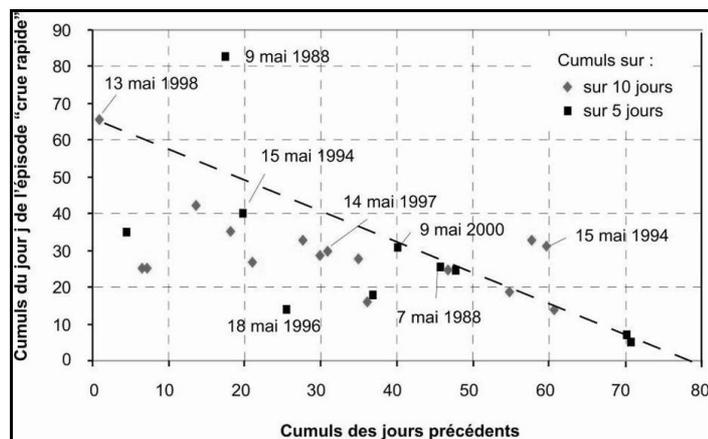
Trois hypothèses peuvent être envisagées pour expliquer les écarts entre les intensités des pluies et les « crues rapides » associées pour le mois de mai : *i*) soit les cellules orageuses sont spatialement plus réduites, donc plus difficiles à détecter ; elles seraient ainsi passées au travers de la maille des 85 stations choisies ; *ii*) soit les épisodes sont de plus courte durée, ce qui semble confirmé par exemple pour les crues du 7 mai 1999 (23,2 mm tombés en 20 mn) ; *iii*) soit les antécédents hydro-climatiques et les cumuls des jours précédents abaisseraient les seuils de déclenchement.

Cette troisième hypothèse a été plus spécifiquement étudiée. L'analyse s'est faite à partir des cumuls quotidiens tout en croisant ces informations avec des données horaires récupérées pour certaines stations situées à proximité des bassins touchés (à moins de 5 km). On observe que plusieurs épisodes pluvieux se sont parfois succédés pendant plusieurs jours consécutifs : mai 1988 (du 7 au 9, 16, 25), mai 1992 (du 25 au 31), mai 1994 (du 14 au 16), mai 2000 (du 6 au 13). Les pluies ont été cumulées sur les 5 jours ( $j_{-5}$ ) puis sur les 10 jours ( $j_{-10}$ ) qui précèdent la date des 23 épisodes « crues rapides » : plus les cumuls des pluies sont élevés sur les 5 ou 10 jours précédents, moins le cumul du jour  $j$  est important.

Plusieurs cas de figures peuvent être différenciés (figure 8) :

- pluies du jour  $j > 60$  mm + sur  $j_{-5} < 20$  mm : 9 mai 1998, 13 mai 1998 ;
- pluies du jour  $j > 30$  mm + sur  $j_{-5} > 30$  mm : 18 mai 1996, 9 mai 2000, 11 mai 2000 ;
- pluies du jour  $j < 10$  mm + sur  $j_{-1} > 30$  mm : 25 mai 1988, 15 mai 1994, 7 mai 2000 ;
- pluies du jour  $j < 10$  mm + sur  $j_{-3} > 60$  mm (10 mai 2000).

**Figure 8** : Pluies mesurées le jour  $j$  et cumulées sur les 5 et 10 jours précédant les épisodes de « crues rapides » recensés au mois de mai. *Daily rains measured the  $d$  day and cumulated on the five and ten previous days before the “flash floods” events observed during May.*



La relation avec les antécédents climatiques est finalement prouvée pour 15 épisodes sur 23 (65%). Les cumuls des jours précédents abaisseraient ainsi les seuils de déclenchement en mai. La complémentarité avec les cumuls hivernaux n'apparaît pas dans les données utilisées : les crues en mai 1988 et 1997 sont systématiquement précédées d'hivers secs. En revanche, il y a bien une phase de préparation qui fait la transition avec les crues turbides hivernales (Le Bissonnais *et al.*, 2002 ; Delahaye *et al.*, 2007).

### 3. Evolution de l'aléa pluviométrique (1983-2005)

A la suite de ces premiers résultats, une question demeure toujours : les seuils de déclenchement ne semblent pas avoir évolués dans le temps et pourtant, le nombre de « crues rapides » a, lui, augmenté depuis le début des années 1990, notamment entre 1992 et 2001 (Douvinet, 2006). Cette question n'est pas simple à trancher : l'analyse du rôle de la pluviométrie s'est limitée jusqu'à présent aux données des stations Météo France. Sans

enregistrer une augmentation ou un abaissement du seuil nécessaire aux « *crues rapides* », le déclenchement pourrait être plus systématique : *i*) si les systèmes précipitants présentent une plus grande étendue spatiale ; *ii*) si les maxima quotidiens donnent des hauteurs d'eau plus élevées ; *iii*) si l'intensité des pluies est plus importante alors que le cumul quotidien reste, lui, identique. Afin de vérifier les deux dernières hypothèses, les données des stations ont, de nouveau, été utilisées.

### 3.1. Distribution des maxima des trois premiers rangs

La distribution dans le temps des maxima de rang 1 (figure 9a) montre que les valeurs les plus fortes ont été recensées au cours de la dernière décennie. Les maxima sont annuellement observés au cours de la période 1992-1999 mais ils sont en revanche moins nombreux entre 1983 et 1992. La répartition des pluies extrêmes des rangs 2 et 3, positionnées indifféremment sur la période étudiée, reste homogène entre les années. Les maxima de rang 3 sont répétitifs pour certaines années (1987, 1994, 1998, 1999). La distribution des Episodes Précipitants les plus Significatifs (EPS) montre que ces systèmes précipitants semblent plus fréquents depuis la fin des années 1990 : sur les 20 EPS recensés, 13 sont apparus entre 1992 et 2001.

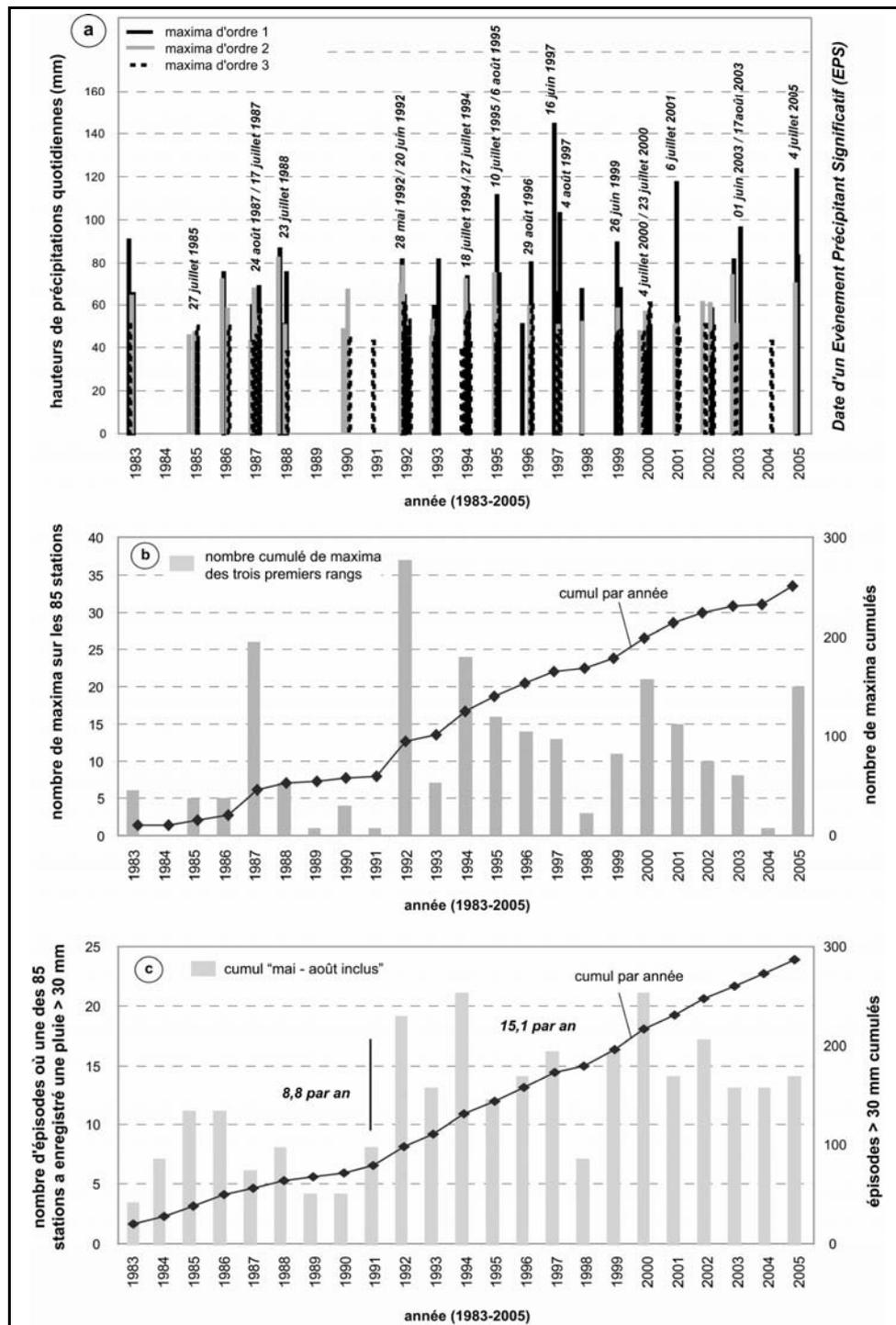
Le nombre total de maxima par année met aussi en avant une concentration des plus fortes valeurs à partir de 1992. Cette évolution n'est toutefois pas constante car les variations sont importantes entre les années. L'année 1992 s'individualise clairement (figure 9b), avec plus de 35 stations qui présentent des maxima (les trois premiers rangs) communs. Des records pluviométriques sont fréquents pour les années 1987, 1994, 2000 et 2005 ; à l'inverse, ils sont faiblement recensés au cours des années 1984, 1993, 1998 et 2004. On tient ici compte des doublons entre les stations, ce qui permet de donner un poids plus significatif aux épisodes à forte extension spatiale détectés par plusieurs stations. Le test de Pettitt utilisé pour détecter une « *rupture* » dans les séries chronologiques étudiées (Pettitt, 1979), confirme, *a contrario*, que la série est aléatoire, acceptant cette hypothèse au-delà du seuil de confiance de 90%. Ce test non paramétrique ne pouvant signaler aucune rupture, celle-ci correspond à l'évolution jugée la plus significative (Paturel *et al.*, 1997).

### 3.2. Evolution du nombre de jours de pluies > 30 mm

Le seuil de 30 mm a également été utilisé pour déceler une éventuelle augmentation sur la période 1983-2005. L'analyse est plus délicate à mener puisque les hauteurs d'eau ne sont pas révélatrices de l'intensité des épisodes. L'étude du nombre de jours > 30 mm pour la période « *mai-août inclus* » met à jour une augmentation des pluies supérieures à ce seuil à partir de 1992, et un accroissement de leur fréquence jusqu'en 2005 : en moyenne, plus de 10 épisodes sont mesurés tous les ans (figure 9c). Le test de Pettitt confirme cette fois-ci une « *rupture* » dans la série chronologique étudiée, définissant une probabilité de dépassement de la valeur critique du test à  $1,95^{-2}$  en 1991. La moyenne passe de 8,8 jours > 30 mm par an (1983-1991) à 15,1 jours de pluies > 30 mm sur la période 1992-2005. Ces résultats sont confirmés par le test de corrélation de rang et par d'autres méthodes statistiques (méthode bayésienne de Lee et Heghinian par exemple). Si des variations peuvent localement exister entre les stations, cette tendance observée à l'échelle régionale confirme des résultats obtenus par ailleurs (Osborn et Hulme, 2002 ; Klein Tank et Können, 2003 ; Cantat et Cador, 2003 ; Moberg et Jones, 2005 ; Maraun *et al.*, 2008) et alimente la discussion autour du « *réchauffement climatique* ». Alors, simple variabilité d'échelle décennale ou amorce de changement climatique ?

Sans enregistrer une variation du seuil physique de déclenchement, la recrudescence des épisodes « *crues rapides* », de 1992 à 2001, peut finalement être, en partie, plus importante à cause d'une répétition croissante et rapprochée dans le temps des maxima quotidiens, d'une augmentation de leur intensité, d'une succession d'Episodes Précipitants Significatifs et d'un

accroissement des pluies supérieures à 30 mm depuis 1992. Ce constat replace au premier plan le rôle de l'intensité des pluies sur la sensibilité de ces espaces, facteur qui est difficile à appréhender en étudiant les hauteurs de pluies quotidiennes mais qui reste le pas de temps le plus court et le plus disponible sur un nombre de stations suffisamment important.



**Figure 9 :** Evolution de l'aléa pluviométrique sur la période 1983-2005 : **a)** répartition dans le temps des maxima de rang 1 et des Episodes Précipitants Significatifs (EPS) ; **b)** nombre de maxima observés sur la période 1983-2005 cumulés par année ; **c)** cumul des jours de pluies > 30 mm. *Rainfall hazard evolution from 1983 to 2005: a) distribution of the 1<sup>st</sup> maximum order value and of the Significant Rainfall Event (SRE); b) the cumulative number of the 3<sup>rd</sup> orders maxima registered on the 85 stations for each year ; c) daily rains up to 30 mm.*

## 4. Types de circulations atmosphériques associées aux « *crues rapides* »

Afin de compléter les résultats obtenus par une méthode essentiellement descriptive, une approche explicative par les types de circulations est proposée en deux étapes : la première porte sur l'analyse de la dynamique atmosphérique observée le jour  $j$  ; la seconde, plus élargie dans le temps et dans l'espace, reprend une méthode de classification européenne harmonisée et remise à l'ordre du jour par James (2007) en tenant compte des situations sur les trois jours précédents la date de la crue. Le but ici est de caractériser les types de circulations propices à l'apparition des épisodes « *crues rapides* » et de voir si, comme on le prétend souvent, ce sont les fronts orageux qui en sont à l'origine (Merle *et al.*, 2001 ; Meyer, 2001 ; MEDD, 2005). Par ailleurs, l'échelle synoptique constitue par excellence le cadre de prévision opérationnelle sur une échéance de un à trois jours. J.-P. Vigneau (2004) définit les « *types de circulations* » comme étant des situations synoptiques caractérisées par les structures et les trajectoires des masses d'air. Les « *types de temps* » témoignent, quant à eux, des rapports qui s'établissent entre cette échelle synoptique et les facteurs géographiques qui agissent à des échelles plus locales (Douguedroit, 2004 ; Cantat, 2005a).

### 4.1. Structures et origines des masses d'air associées au jour $j$

La structure des masses d'air a été analysée le jour de la date de recensement de la « *crue rapide* » à partir de plusieurs sources : les Bulletins Météorologiques Européens (BME) établis à différentes altitudes (500, 700 et 850 hPa) et consultables sur le site [www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de) ; les images prises par le satellite NOAA-ESRL (*Earth System Research Laboratory*) disponibles sur le site [www.cdc.noaa.gov](http://www.cdc.noaa.gov) ; les radiosondages pour des épisodes proches de la station de Trappes ([www.meteocentre.com](http://www.meteocentre.com)) ; les cartes des situations atmosphériques sur plusieurs jours (<http://weather.uwyio.ed>).

Cinquante trois des 79 épisodes « *crues rapides* », soit 67%, sont apparus dans des situations de marais barométriques (MB), et 26 (33%) sont liés au passage de systèmes frontaux (F). Ces résultats sont instructifs car les « *crues rapides* » semblent plus souvent déclenchées par des orages de masses d'air alors que les systèmes frontaux sont réputés pour être les plus violents. Il n'y a pas, ou peu, de cisaillement, et les courants sont nuls ou faibles dans toute l'épaisseur de la troposphère. En raison de l'insolation et de la relative sécheresse, cet air se réchauffe fortement dans les basses couches ; l'instabilité tend alors à devenir de plus en plus forte en fin de journée et durant la nuit (Belliard *et al.*, 1975).

La trajectoire des masses d'air du jour  $j$  a aussi été identifiée ; les masses d'air circulant dans un flux de sud-ouest (cône directionnel compris entre 210 et 240°) représentent 64% des circulations et 87% avec les flux de sud et d'ouest (180-270°). Les masses d'air stagnantes, associées à des marais barométriques, sont alimentées par des flux provenant principalement de sud-ouest (30) et, secondairement, de sud (10). Dans le cas des situations frontales (Front Chaud, FC, ou Front Froid, FF), les flux viennent du sud-ouest (21) et de l'ouest (5). Les flux d'est, de sud-est et de sud sont toujours associés à des marais barométriques. La répartition mensuelle démontre une prédominance des masses d'air circulant dans un flux de SW (51), un nombre plus élevé des flux de sud au mois de mai (7) et du nord-est en août (4) (tableau 4).

Ces observations rejoignent les résultats de précédentes études menées dans les régions du nord-ouest de l'Europe (Pédelaborde, 1957 ; Escourrou, 1978). Les influences maritimes, véhiculées par des circulations d'ouest, prédominent. « *L'étendue géographique sous les influences maritimes est vaste en raison de l'absence de reliefs côtiers vigoureux et perpendiculaires susceptibles de bloquer les masses d'air d'origine océanique (...). Après quelques jours de canicule, le scénario est classique : en liaison avec des avancées d'air plus frais par l'Atlantique, la formation de fronts orageux vient systématiquement interrompre*

*l'installation des influences sub-tropicales chaudes et sèches en provenance de la péninsule ibérique ou de la Méditerranée » (Cantat, 2005b).*

trajectoires	mai	juin	juillet	août	total	flux	cône directionnel
nord (N)	0	0	0	0	0	↓	337,5° - 22,5°
nord-est (NE)	0	0	0	4	4	↗	22,5° - 67,5°
est (E)	1	0	1	1	3	←	67,5° - 112,5°
sud-est (SE)	1	1	0	0	2	↘	112,5° - 157,5°
sud (S)	7	3	0	0	10	↑	157,5° - 202,5°
sud-ouest (SW)	13	18	10	9	49	↙	202,5° - 247,5°
ouest (W)	1	0	3	1	5	→	247,5° - 292,5°
nord-ouest (NW)	0	0	1	0	1	↖	295,5° - 337,5°
pas de direction	0	2	1	1	4		pas de direction
<b>total</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>16</b>	<b>16</b>	<b>79</b>		

**Tableau 4 :** Origine des masses d'air observées le jour de la date de recensement de la « crue rapide ». *Origin of the air mass circulation observed the d day of the « flash flood » event.*

#### 4.2. Typologies sur j-3 d'après la méthode de Hess-Brezowsky

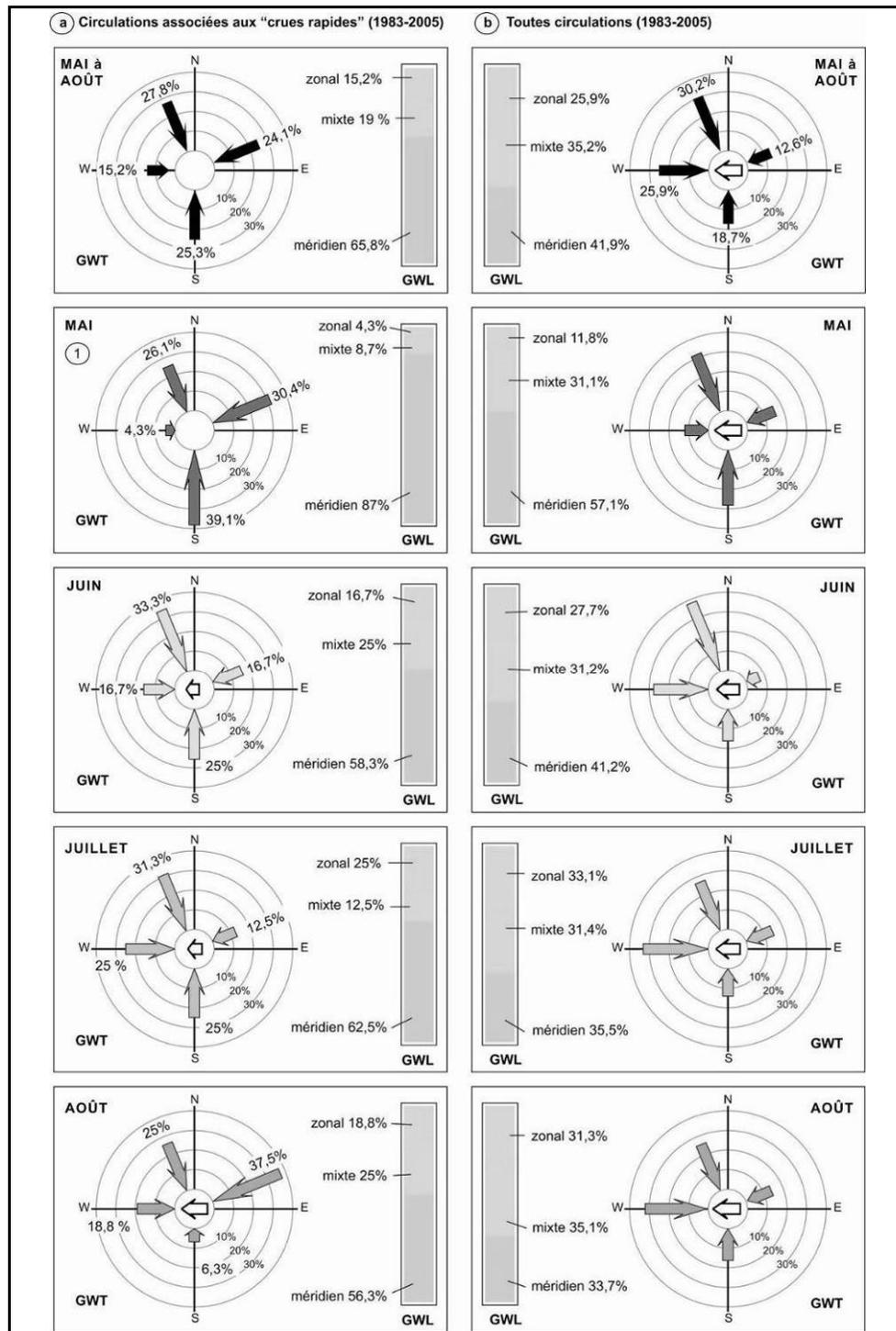
Une seconde typologie est proposée au moyen de la méthode objective de classification européenne de Hess et Brezowsky. Cette méthode a été développée et mise à jour par le PIK – *Potsdam Institut für Klimafolgenforschung* afin de caractériser la circulation atmosphérique et sa variabilité sur l'Océan Atlantique Nord et l'Europe (Gerstengarbe et Werner, 2005).

La méthode repose sur l'analyse de la distribution du champ de pression au niveau de la mer et du géopotential à 500 hPa au-dessus de l'Océan Atlantique Nord et de l'Europe. Vingt neuf types de circulations atmosphériques (Grosswetterlagen ou GWL) sont distingués, regroupés en trois types principaux (zonal, mixte et méridien) ou en cinq grands types (GWT = *Grosswettertypen*). Dans le cadre du programme COST-733, P. James (2007) a développé une version objective (automatique) de la méthode de Hess-Brezowsky, utilisée dans cet article. Cette méthode présente l'avantage d'être utilisable sur l'ensemble de l'Europe. Le catalogue des GWL quotidiens, mis à jour en continu, a été utilisé pour diverses études statistiques de fréquence, persistance et probabilité de transition entre les GWL (Bárdossy et Caspary, 1990 ; Klaus, 1993 ; Kysely et Huth, 2006), plus rarement dans le cadre de recherches sur les liens entre la variabilité climatique et celle des écoulements fluviaux (Stahl *et al.*, 2002), et encore moins pour étudier la relation entre des épisodes pluvieux de forte intensité et des inondations associées (Dupont *et al.*, 2008 ; Ioana-Toroimac *et al.*, 2007).

L'analyse des types de circulations démontre une grande variabilité dans le temps et dans l'espace des « précipitations à risques » et elle permet aussi d'identifier les caractéristiques des situations météorologiques qui en sont à l'origine. En référence aux 3 classes principales (zonal, mixte, méridien), et pour l'ensemble de la période étudiée (mai à août inclus), près des deux tiers des épisodes sont liés à des circulations méridiennes alors qu'habituellement, ces dernières représentent 42% des cas observés au cours de cette période (figure 10).

Cette surreprésentation traduit le caractère pluviogène des circulations méridiennes. Le classement en cinq GWT fait ressortir, à parts égales, trois configurations principales : 27,8% des épisodes pluvieux sont associés aux circulations de nord-ouest et nord ; 25,3% aux circulations de sud ; 24,1% aux circulations de nord-est et est. Les 79 épisodes pluvieux sont associés dans 71% des cas à des situations à centre dépressionnaire situé au large de l'Europe occidentale, en premier lieu à proximité des îles Britanniques et, secondairement, à proximité du Portugal. Simultanément, un centre de hautes pressions de surface se situe sur l'Europe du Nord et/ou centrale. Les épisodes fortement pluvieux associés à des circulations méridiennes

représentent, mois par mois, plus de la moitié du total des événements. Le mois de mai est le plus fortement concerné (87%).



**Figure 10 :** a) Proportion d'événements pluvieux ayant généré des « crues rapides » (1983-2005), pour chaque classe principale de GWL et pour chaque GWT, et b) Comparaison avec l'ensemble des circulations atmosphériques sur la même période. Représentation des 5 classes de GWT sous forme de flèches orientées (W ; NW et N ; NE et E ; S) et d'une flèche blanche au centre de la rose des vents pour les situations à centre d'action sur l'Europe Centrale (EC). a) *Synoptic circulations linked to « flash floods » (1983-2005), classified for each principal type of Grosswetterlagen and Grosswettertypen, and b) comparison with the atmospheric circulations on the same period. Representation of 5 GWT classes with oriented arrows (W ; NW and N ; NE, S); the white arrow indicate the action (or not) of Central Europe action.*

Ces circulations méridiennes de printemps sont liées au développement de situations à talweg d'altitude (bas géopotentiels) aux latitudes moyennes. Ces situations météorologiques ont une forte influence sur la cyclogenèse et les précipitations printanières sur toute l'Europe occidentale ; les espaces touchés par les pluies de forte intensité dépendant de la position en longitude de l'axe du talweg (Moron, 1990 ; Planchon, 2005). En été (soit à partir de début juin), le courant perturbé est plus fréquemment zonal, même s'il est lent et relativement haut en latitude (figure 10).

Des précipitations orageuses intenses, sous la forme soit de cellules isolées, soit de fronts actifs, peuvent se produire sur l'espace étudié en fonction du type de circulation et de la trajectoire des perturbations (Doswell *et al.*, 1996). Les systèmes frontaux déclenchent des phénomènes orageux sur une plus grande extension spatiale. La proportion d'événements fortement pluvieux pour chaque GWT, calculée mois par mois, permet non seulement de faire ressortir plus en détail les types de circulations générateurs de fortes pluies sur l'ensemble de l'espace étudié, mais aussi d'en examiner l'évolution saisonnière.

Les circulations perturbées de sud printanières, marquées en particulier par une position préférentielle des talwegs d'altitude à l'ouest du méridien-origine et par des basses pressions de surface positionnées à proximité des îles Britanniques, caractérisent des situations « à anomalies pluviométriques positives » (Planchon, 2005). De mai à juillet, l'augmentation de la proportion des fortes pluies associées aux circulations de nord-ouest à nord et d'ouest au détriment de celles de sud, est à relier à l'évolution saisonnière habituelle de la circulation d'échelle synoptique décrite plus haut (réactivation de la circulation d'ouest en été et/ou développement des marais barométriques).

L'importance prise par les circulations de nord-est et d'est en août (33,3% contre 13,2% en moyenne, figure 10) illustre le cas des situations à hautes pressions de surface centrées sur l'Europe du Nord, s'opposant à la progression vers le nord-est des systèmes perturbés liés à un centre de basses pressions généralement situé sur le proche Atlantique. Ainsi, les pluies violentes, plus fréquentes en début d'été (juin et juillet) sur la partie sud-ouest de la zone d'étude, tendent à se décaler vers le nord au mois d'août. Un gradient spatial, commun aux observations précédentes, est donc à nouveau retrouvé à l'échelle synoptique.

Les 20 épisodes majeurs à forte extension spatiale restent majoritairement associés à des circulations méridiennes (15 épisodes sur 20) de sud et de nord-est. Les épisodes affectant des espaces restreints sont souvent liés à des circulations de sud et de nord-ouest (méridiennes là aussi) ; un certain rééquilibrage s'opère avec les circulations zonales et mixtes. Ces résultats confirment le caractère très aléatoire des épisodes ponctuels, liés à des marais barométriques, tandis que les circulations d'ouest, touchant un plus grand nombre de bassins versants, sont génératrices d'événements à plus forte extension spatiale.

## Conclusion

L'analyse de la dynamique des précipitations de forte intensité, à des échelles spatiales et temporelle fines, a permis d'améliorer les connaissances sur l'aléa pluviométrique à l'origine des « crues rapides » apparaissant dans les régions du nord de la France. On peut finalement répondre aux différentes questions initialement posées en introduction.

Dans 80% des événements déclarés, les épisodes ont donné lieu à des pluies > 40 mm. Si les stations mesurent, de manière ponctuelle, ces abats d'eau remarquables, les données des stations bénévoles et les images radar sont requises pour compléter les mesures aux échelles fines. On peut différencier des phénomènes pluviométriques affectant de grands espaces (20) et des épisodes focalisés sur des espaces géographiques plus restreints (48). Cependant, les

pluies à l'origine des « *crues rapides* » sont extrêmement variables et hétérogènes entre les événements, voire entre des bassins versants proches. Ce constat replace au premier plan le rôle de l'intensité de la pluie sur la sensibilité de ces espaces du nord de la France.

En étudiant les données à partir d'un réseau de stations harmonieusement réparties dans l'espace, on arrive à retrouver 47% des épisodes en étudiant les maxima quotidiens des trois premiers rangs. Ce pourcentage montre à quel point les précipitations à l'origine des crues sont souvent associées à des records pluviométriques mesurés dans ces régions. L'étude « *par seuil* » améliore considérablement la part des épisodes détectés. Le seuil 30 mm est suffisamment représentatif pour être une « *averse extrême caractéristique* » pour laquelle une « *crue rapide* » peut apparaître entre juin et août inclus, même s'il faut tenir compte de l'éloignement de la station et les possibilités de sous enregistrement de l'intensité des pluies.

Les crues recensées au mois de mai sont néanmoins associées à des pluies plus faibles mais liées à des antécédents hydroclimatiques spécifiques. La part des épisodes détectés est considérablement améliorée en abaissant les seuils d'intensité, passant de 9% au seuil de 50 mm à 70% à 30 mm. Ces événements font surtout la transition entre un système hivernal et le système « *estival* » (juin – août inclus), au sens strict du terme.

L'étude « *par seuil* » confirme, en revanche, que les précipitations de forte intensité sont une variable nécessaire mais pas suffisante pour expliquer l'apparition des « *crues rapides* ». Soixante pourcents des pluies supérieures à 50 mm et 78% des pluies supérieures à 30 mm ne sont en effet pas associées à de tels événements dans ces régions de plateaux du nord de la France. En parallèle, l'analyse de la distribution des maxima souligne l'existence d'un gradient spatial qui est confirmé par l'étude « *par seuil* » et par l'étude des types de circulations synoptiques. Les pluies de forte intensité sont plus fréquentes au mois de juin dans la partie occidentale (Calvados, Seine-Maritime, Eure), en juillet dans la partie centrale de la zone d'étude (Seine-Maritime, Pas-de-Calais, sud de l'Aisne), et en août dans le Nord. Ce gradient spatial peut, en partie, guider la distribution spatiale et temporelle des « *crues rapides* » (Douvinet, 2006). Néanmoins, il reste difficile de statuer sur cette question de manière définitive : les épisodes « *crues rapides* » sont généralement associés à des marais barométriques (78%) et le faible gradient barométrique favorise, dans ce cas-là, l'expression de facteurs géographiques locaux accentués à toutes les échelles, ce qui rend d'ailleurs la moindre prévision délicate.

L'ensemble des résultats obtenus dans cette étude fournit les prémices à une mise en place d'un système d'alerte opérationnel face à ce type de risque « *crues rapides* ». Les circulations méridiennes sont potentiellement les plus pluvio-gènes, donc les plus « *à risque* ». Il convient également de tenir compte des circulations zonales et mixtes puisque lorsqu'elles apparaissent, elles touchent un grand nombre de bassins. Les flux de sud-ouest à  $j-1$  sont généralement les plus aptes à déclencher des systèmes instables. Toute la difficulté du système d'alerte réside alors dans les imbrications des niveaux spatiaux, entre les échelles synoptiques et les échelles fines où les composantes locales agissent (Neppel, 1997 ; Salek *et al.*, 2006).

Si une mise en alerte est possible, elle doit être couplée aux facteurs géographiques locaux et aux composantes environnementales *i*) qui influent sur la stabilité des masses d'air et *ii*) qui jouent sur la dynamique des écoulements lors des « *crues rapides* » tels que la morphologie, les états de surfaces, la nature de l'occupation du sol (Delahaye *et al.*, 2007 ; Douvinet, 2008). Un système d'alerte qui associe un système de prévision météorologique (variable suivant la saison étudiée) et le fonctionnement hydrologique des bassins versants semble l'outil le plus approprié. Différents seuils d'alerte doivent être combinés pour mettre en place une politique de prévision efficace et adapté à ce type de risque dans ces régions. Dans l'optique du

*Développement durable*, la prévision du temps et du climat occupe une place essentielle (Carrega *et al.*, 2004 ; Béland, 2005 ; Cantat, 2008). Mais, concrètement, pour le scientifique la question de *prévisibilité* se pose différemment selon un avenir envisagé à courte échéance (prévision du temps) ou à long terme (évolution du climat).

A court terme, il s'agit de prévoir le plus tôt possible la configuration météorologique générale et d'estimer sa probabilité d'évoluer en situation extrême. Dans ce cas, pour être opérationnelle, la prévision doit être précise, à la fois dans le temps et dans l'espace. Un gain de quelques jours, voire quelques heures, peut alors s'avérer déterminant pour prévenir les populations et minimiser les conséquences dramatiques des excès de l'atmosphère (particulièrement importantes pour les événements courts et très violents tels que les orages, par exemple). Dans les années à venir, des progrès sensibles sont attendus dans la prévision des phénomènes extrêmes, notamment avec la mise en place de Thorpex (Béland, 2005) : « *un des objectifs importants du programme Thorpex est d'améliorer la prévision des phénomènes météorologiques dangereux plusieurs jours à l'avance* » (Bourgeault, 2002). Le gain de fiabilité de ce système reposera sur le croisement, dans un « *super ensemble* », des prévisions déterministes et probabilistes des divers participants.

A long terme, il ne s'agit plus de prévoir un phénomène en particulier mais d'envisager l'évolution globale du climat, dans ses caractères moyens comme dans ses excès, à l'échelle zonale et régionale (cf. rapports du GIEC). Le climat futur est ainsi simulé à partir de modèles numériques faisant appel aux lois de la physique et de la thermodynamique, couplé à des perspectives d'évolution socio-économiques à l'échelle mondiale. La complexité des interrelations entre processus naturels et anthropiques rend ces projections encore incertaines, avec des scénarios d'évolutions climatiques très variables dans le temps et dans l'espace. Si la plupart des simulations converge aujourd'hui vers un réchauffement global et une multiplication des phénomènes extrêmes, les chercheurs restent malgré tout très prudents dans la mesure où ils savent combien leurs modèles restent imparfaits en raison de la compréhension encore très partielle du fonctionnement du système Terre-Atmosphère...

**Remerciements** : Les travaux menés dans le cadre de cette étude ont été soutenus par le programme SYMBAD (2004-2007) *Analyse de la structure et de la dynamique de systèmes spatiaux complexes – Les bassins versants sensibles aux « crues rapides »* (ACI « *Systèmes Complexes en SHS* ») et par le projet ECREIS financé par la fondation MAIF et soutenu par le GDR 2663 CNRS RICLIM « *Risques liés au climat* » (2007-2010) *Dynamique des masses d'air et risques climatiques*. Les auteurs tiennent à remercier F. Lefebvre (étudiant Master 1, Le Havre) et Météo France pour l'acquisition des données pluviométriques nécessaires à cette étude, ainsi que les deux correcteurs anonymes qui ont permis d'améliorer la qualité de cet article.

## Bibliographie

- ALEXANDERSON H., 1986 : A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology*, **6**, 661-675.
- ANQUETIN S., MINISCLOUX F., CREUTIN J.D. et COSMA S., 2003 : Numerical simulation of orographic rainbands. *Journal of geophysical research*, **108**, CIP. 11, 1-13.
- BARDOSSY A. et CASPARY H.J., 1990 : Detection of climate change in Europe by analysing European atmospheric circulation patterns from 1881 to 1989. *Theoretical and Applied Climatology*, **42**, 155-167.

- BELAND M., 2005 : Révolutionner la prévision du temps à moyenne échéance. *Atmosphériques*, **26**, 30-31.
- BELLIARD R., FORGET R. et HEMOND A., 1975 : *Le Voyage aérien*. Editions du Cosmos, Paris, Tome 1, 8<sup>ème</sup> édition, 200 pages.
- BIGOT S., 2001 : Détection des discontinuités temporelles au sein des séries climatiques : point méthodologique et exemple d'application. *Actes des Journées de Climatologie* de la Commission « Climat et Société » du CNFG, 27-46.
- BOURGEAULT P., BINDER P., BUZZI A., DIRKS R., HOUZE R., KUETTNER J., SMITH R., STEINACKER R. et VOLKERT H., 2001 : The MAP special observing period. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, **82**, 443-462.
- BOURGEAULT P., 2002 : Marions-les (programme THORPEX). *Atmosphériques*, **26**, 24-31.
- CANTAT O., 2003 : Les limites dans l'analyse des longues chroniques pluviométriques. *Actes du Séminaire de l'UMR-CNRS 6554 LETG*, « *Les chroniques hydrologiques et climatiques* », 16-18.
- CANTAT O. et CADOR J.-M., 2003 : La variabilité : une caractéristique fondamentale des chroniques hydroclimatiques. Réflexions sur la normalité et l'anormalité. *Actes du Séminaire de l'UMR-CNRS 6554 LETG*, « *Les chroniques hydrologiques et climatiques* », 12-16.
- CANTAT O., 2005a : *Normandie : terre de contrastes. Conséquences hydrologiques et environnementales d'un climat tempéré mais pas sans contrastes...* in Les hydrosystèmes normands - Livret-Guide de l'excursion 2005 de la commission « *Hydrosystèmes Continentaux* » du CNFG organisé par le Geophen-LETG, Caen, 22-42.
- CANTAT O., 2005b : Dynamique spatio-temporelle d'un événement météoclimatique extrême : la canicule de l'été 2003 en Europe de l'Ouest. *Climatologie*, **2**, 99-136.
- CANTAT O., 2008 : Développement durable : une pensée de référence difficile à mettre en oeuvre. *Droit et Environnement*, numéro spécial, **160**, 12-13.
- CARREGA P., DUBREUIL V. et RICHARD Y., 2004 : Climatologie et développement durable. *Historiens et Géographes*, **387**, 205-209.
- DELAHAYE D., 2002 : *Apport de l'analyse spatiale en géomorphologie - modélisation et approche multiscalaire des risques*. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, 2 tomes, Laboratoire Modélisation et Traitements Graphiques (MTG), Université de Rouen, 250 pages.
- DELRIEU G., 2004 : L'Observatoire Hydro-météorologique Méditerranéen Cévennes-Vivarais (The Cévennes-Vivarais Mediterranean Hydro-meteorological Observatory). *La Houille Blanche*, **6**, 83-88.
- DELAHAYE D., DOUVINET J. et LANGLOIS P., 2007 : *Analyse de la structure et de la dynamique d'un système spatial complexe : le bassin versant. Apports à la modélisation des risques hydrologiques*. Rapport final du projet SYMBAD, sept. 2007, 80 pages.
- DOSWELL C.A., BROOKS H.E. et MADDOX R.A., 1996 : Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology. *Weather and Forecasting*, **11**(4), 560-581.
- DOUGUEDROIT A., 2004 : Quelle « exception française » en matière de « types de temps » ? *Noréis*, **191**(2), 33-39.

DOUVINET J., 2006 : Intérêts et limites des données « *CatNat* » pour un inventaire des inondations. L'exemple des « *crues rapides* » liées à de violents orages (Bassin Parisien, Nord de la France). *Norois*, **201**, 17-30.

DOUVINET J., 2008 : *Les bassins versants sensibles aux « crues rapides » - Analyse de la structure et de la dynamique de systèmes spatiaux complexes*. Thèse de doctorat de Géographie, Université de Caen Basse-Normandie, 391 pages.

DOUVINET J., DELAHAYE D. et LANGLOIS P., 2009 : Stratégies pour une spatialisation du risques « *crues rapides* » dans le Nord du Bassin Parisien : une approche à deux niveaux. *Actes du Colloque ThéoQuant 2009*, Besançon, 4-6 mars 2009, 2 pages.

DUPONT N., PLANCHON O., CADOR J.M., DELAHAYE D. et DOUVINET J., 2008 : Types de circulations atmosphériques et de crises hydrologiques dans le nord-ouest de la France : approches croisées de risques liés au climat, In Lamarre D. : *Climat et Risques : changements d'approches*, Collection SRD (Lavoisier Ed., Paris), 63-92.

ESCOURROU G., 1978 : *Climats et types de temps en Normandie*. Thèse de Doctorat, Université de Lille III, 3 volumes, 1081 et 649 pages.

GERSTENGARBE F.-W. et WERNER P.C. 2005 : *Katalog der Großwetterlagen Europas (1881-2004)*. PIK Report n°100, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, 153 pages.

HEINO R., 1996 : Metadata and their role in homogenization. *Proc. Seminar on Homogenization of Surf. Instrum. Data*, Budapest, 5-8.

IOANA-TOROIMAC G., BELTRANDO G., PLANCHON O. et ZAHARIA L., 2007 : Typologie des situations météorologiques associées à de forts épisodes pluvieux dans le bassin versant de la Prahova (Roumanie). *Actes du 20<sup>ème</sup> colloque de l'AIC*, Tunis, 324-329.

JAMES P.M., 2007 : An objective classification for Hess and Brezowsky Grosswetterlagen over Europe. *Theoretical and Applied Climatology*, **88**, 17-42.

JANSA A., MARTINEZ C., CAMPINS J. et GENOVES A., 2007 : Atmospheric patterns for Mediterranean heavy rains. *Abstracts of the 9th EGU Plinius Conference*, 16.

KERGOMARD C., BIGOT S., CHARABI Y. et LERICHE P., 2002 : Climat urbain et qualité de l'air : approches géographiques et collaborations pluridisciplinaires. *Géographies*, BAGF, **4**, 462-473.

KLAUS D., 1993 : Zirkulations- und Persistenzänderungen des Europäischen Wettergeschehens im Spiegel der Grosswetterlagenstatistik. *Erdkunde*, **47**, 85-104.

KLEIN TANK A.M.G. et KÖNNEN G.P., 2003 : Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe (1946-1999). *Journal of Climate*, **16**, 3665-3680.

KYSELÝ J. et HUTH R., 2006 : Changes in atmospheric circulation over Europe detected by objective and subjective methods. *Theoretical and Applied Climatology*, **85**, 19-36.

LAGANIER R., PIQUET P., SALVADOR P.-G. et SCARWELL H.-J., 2000 : Inondations, territoire et aménagement: l'évolution de la prise en compte du risque inondation dans la vallée de la Canche (Pas-de-Calais, France). *Géocarrefour*, Lyon, 375-382.

LAMBERT R., 1996 : *Géographie du cycle de l'eau*, Editions Presses Universitaires du Mirail (PUM), Toulouse, 439 pages.

Le BISSONNAIS Y, THORETTE J., BARDET C. et DAROUSSIN J., 2002 : *L'érosion hydrique des sols en France*. INRA-IFEN, 109 p. (<http://erosion.orléans.inra.fr/rapport2002/>).

- LHERMINEZ S., 1998 : *Contraintes hydro-climatiques et espace géographique : la gestion des inondations et des orages dans le bassin minier : le cas du Douaisis*. Mémoire de maîtrise, Université des Sciences et Technologies de Lille (USTL), 130 pages.
- MARAUN D., OSBORN T.J. et GILLET N.P., 2008 : United Kingdom daily precipitation intensity : improved early data, error estimates and an update from 2000 to 2006. *International Journal of Climatology* ([www.interscience.wiley.com](http://www.interscience.wiley.com)) DOI: 10.1002/joc.1672
- Météo France, MEDD (Ministère de l'Écologie et du Développement Durable), 2005 : *Pluies extrêmes sur le Nord de la France* (sur CD-ROM).
- MEDD, Ministère de l'Environnement et du Développement Durable, 2005 : *Mission d'enquête sur le régime d'indemnisation des victimes des catastrophes naturelles*. Rapport de l'Inspection Générale des Finances (IGF), du Conseil Général des Ponts et Chaussées (CGPC), et de l'IGE, l'Inspection Générale de l'Environnement, 95 pages + annexes.
- MERLE J.-P., HUET P., MARTIN X., VERREL J.-L., RAT M., BOUTIN J.-N., BOURGET B. et VARRET J., 2001 : *Inondations et coulées boueuses en Seine-Maritime. Proposition pour un plan d'action*. Rapport de l'Inspection Générale de l'Environnement et du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Aménagement, 130 pages.
- MESTRE O., 2000 : *Méthodes statistiques pour l'homogénéisation de longues séries climatiques*. Thèse de Doctorat de Mathématiques appliquées et Statistiques, Université Paul Sabatier, Toulouse, 233 pages.
- MEYER E., 2001 : *Evolution des paysages ruraux et phénomènes d'inondation boueuse en terres de grande culture. Le cas du ru de Senneville (Yvelines)*. Thèse de Doctorat de Géographie, Paris IV, Sorbonne, 413 pages.
- MOBERG A. et JONES P.D., 2005 : Trends in indices for extremes in daily temperature and precipitation in Central and Western Europe, 1901-99. *International Journal of Climatology*, **25**, 1149-1171.
- MOISSELIN J.M., SCHNEIDER M., CANELLAS C. et MESTRE O., 2002 : Les changements climatiques en France au 20<sup>ème</sup> siècle. Etude des longues séries de données homogénéisées de précipitation et température. *La Météorologie*, **38**, 45-56.
- MORON V., 1990 : *Contribution à l'étude de la variabilité climatique mensuelle en Europe*. Mémoire de D.E.A. (non publié), Université de Bourgogne, Dijon, 75 pages.
- MULLER A., 2006 : *Comportement asymptotique de la distribution des pluies extrêmes en France*. Thèse de Statistiques appliquées et Hydrologie, Université de Montpellier II, 246 pages.
- NEPPEL L., 1997 : *Etude du risque pluvial en région Languedoc-Roussillon : caractérisation de l'aléa pluviométrique*, Thèse de Doctorat, Montpellier II, 272 pages.
- OSBERG T. et HULME M., 2002 : Evidence for trends in heavy rainfall events over the UK. *Philosophical Transactions*, **360**, 1313-1325.
- PATUREL J.E., SERVAT E., KOUAME B., LUBES H., OUEDRAOGO M. et MASSON J.M., 1997 : Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part II: An integrated regional approach. *Journal of Hydrology*, **191**, 16-36.
- PEDELABORDE P., 1957 : *Le climat du Bassin Parisien, essai d'une méthode rationnelle de climatologie physique*. Paris, 539 pages + atlas.
- PETTITT A.N., 1979 : A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, **28**(2), 126-135.

PLANCHON O., 2005 : Les printemps pluvieux des années 1980 : retour sur une particularité météorologique et climatique de la fin du vingtième siècle en Europe occidentale. *Actes du 18<sup>ème</sup> colloque de l'AIC*, Gênes, 349-352.

PRADIER S., 2002 : *Caractéristiques de l'écoulement et des précipitations observés durant MAP : une analyse par radar et simulation numérique*. Thèse de Doctorat en Aérologie, Université Paul Sabatier, Toulouse, 223 pages.

SALEK M., BREZKOVA L. et NOVAK P., 2006 : The use of radar in hydrological modeling in the Czech Republic – case studies on flash floods. *Natural Hazard and Earth System Sciences*, **6**, 229-236.

STAHL K., HASSLER B. et DEMUTH S., 2002 : Scenarios assessing the influence of climate variability on drought in Europe. *Proceedings of the Fourth International FRIEND Conference*, Cape Town (South Africa), IAHS **274**, 93-100.

VIGNEAU J.-P., 2004 : Un siècle de « *type de temps* » : épistémologie d'un concept ambigu. *Norois*, **191**, 17-27.

VOLKERT H., 2000 : Heavy precipitation in the Alpine region (HERA): area rainfall determination for flood warnings through in-situ measurements, remote sensing and atmospheric modelling. *Meteor. Atmos. Phys.*, **72**, 73-85.

WOTLING G., 1998 : *Etude de l'aléa pluviométrique à Tahiti*, Cahiers de l'ORSTOM, 74 pages.