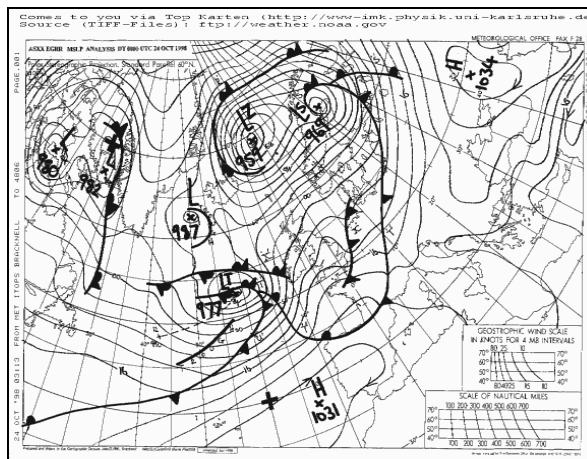


Jean-François OUVRY  
Jean-Baptiste RICHET

*François HELLOCO - Consultant*

## Système d'anticipation des épisodes pluvieux hivernaux générateurs de désordres hydrologiques

### Etude de faisabilité



Etude réalisée en mars 2003



## **Table des matières**

|  |           |
|--|-----------|
| Table des matières .....   | 2         |
| Table des illustrations.....   | 4         |
| Figures .....  | 4         |
| Tableaux .....   | 5         |
| <b>Introduction générale .....</b>   | <b>7</b>  |
| <b>1. Contexte de l'étude .....</b>  | <b>9</b>  |
| 1.1. Analyse bibliographique .....   | 9         |
| 1.2. Le contexte agro-pédologique .....  | 13        |
| 1.2.1. Généralités.....  | 13        |
| 1.2.2. Quelques précisions sur la battance .....   | 14        |
| 1.2.3. Evolution de la surface du sol dans le temps .....  | 14        |
| 1.2.4. Spécificités de la période d'octobre à avril .....  | 15        |
| <b>2. Recensement des données disponibles.....</b>   | <b>17</b> |
| 2.1. Données relatives à la pluviométrie .....   | 17        |
| 2.2. Données relatives aux désordres hydrologiques .....   | 18        |
| 2.2.1. Les données recueillies par l'AREAS .....   | 18        |
| 2.2.2. Les données « CatNat ».....   | 18        |
| 2.2.3. Autres sources potentielles.....  | 19        |
| <b>3. Présentation de la méthodologie utilisée au démarrage de l'étude.....</b>                    | <b>20</b> |
| 3.1. Définition de la période d'analyse et de la zone d'étude .....                                | 20        |
| 3.2. Validations des données pluviométriques .....   | 21        |
| 3.3. Exploitation des données pluviométriques.....   | 22        |
| 3.4. Exploitation des données CatNat .....   | 22        |
| 3.5. Comparaison entre la base d'événements pluviométriques et la base d'événements<br>CatNat..... | 22        |
| 3.6. Utilisation de la base d'événements AREAS.....  | 22        |
| <b>4. Validation et analyse de chaque type de donnée .....</b>                                     | <b>24</b> |
| 4.1. Les sites de mesures de l'AREAS .....   | 24        |
| 4.1.1. Localisation et caractéristiques .....  | 24        |
| 4.1.2. Schéma d'ensemble.....  | 25        |
| 4.1.3. Représentativité de ces trois sites.....  | 25        |
| 4.2. Analyse des postes pluviométriques de l'AREAS .....   | 26        |
| 4.2.1. Validation des données.....   | 26        |
| 4.2.2. Comparaison des données de cumul mensuel des postes AREAS.....                              | 29        |
| 4.3. Analyse des postes Agence de l'Eau Seine-Normandie et Météo-France .....                      | 31        |
| 4.4. Comparaison entre les postes pluviométriques de l'AREAS et les autres postes .....            | 34        |
| 4.5. Données de ruissellement de l'AREAS .....   | 37        |
| 4.5.1. Validation des données.....   | 37        |
| 4.5.2. Exploitation des données.....   | 39        |
| 4.6. Données Cat. Nat.....   | 43        |
| 4.7. Coupures de presse.....   | 47        |
| 4.8. Mesure des débits par la DIREN .....  | 49        |
| <b>5. Constitution d'une base d'événements hydrologiques.....</b>                                  | <b>52</b> |
| 5.1. Objectif recherché .....  | 52        |
| 5.2. Réalisation d'un outil cartographique .....   | 53        |
| 5.3. Le classement des événements.....   | 53        |
| 5.4. Le tableau général des événements .....   | 54        |
| 5.5. Analyse et limites de la base constituée .....  | 56        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>6. Comparaison de la base d'événements hydrologiques et des données pluviométriques.....</b>                                  | <b>58</b> |
| 6.1. Rappel du principe général.....   | 58        |
| 6.2. Définition des critères de qualité.....   | 59        |
| 6.3. Résultats sur un poste de référence : Goderville.....   | 60        |
| 6.4. Applications à d'autres postes : Saint-Laurent et Sommesnil.....  | 63        |
| 6.5. Variation des seuils et durées de cumul sur le poste de Goderville.....   | 64        |
| 6.5.1. Durées de cumul courtes.....  | 64        |
| 6.5.2. Durées de cumul longues.....  | 65        |
| 6.6. Seuil de 80 mm en 10 jours sur Goderville : analyse approfondie.....  | 66        |
| 6.6.1. Analyse des cas sans correspondance.....  | 66        |
| 6.6.2. Prise en compte conjointe de la période pluvieuse initiale et de la pluie génératrice.....                                | 69        |
| <b>7. Détermination de la pluie génératrice à partir de la base de données AREAS sur les bassins versants expérimentaux.....</b> | <b>72</b> |
| 7.1. Informations utilisées.....   | 72        |
| 7.2. Définition du caractère majeur d'un événement dans ce contexte.....   | 73        |
| 7.3. Influence de la pluie de la veille.....   | 74        |
| 7.4. Analyse des événements hydrologiques majeurs.....   | 75        |
| 7.4.1. Définition des conditions d'apparition des événements majeurs.....  | 76        |
| 7.4.2. Analyse des événements non majeurs remplissant les conditions de déclenchement.....                                       | 78        |
| 7.4.3. Bilan.....  | 81        |
| 7.5. Synthèse.....   | 82        |
| <b>8. Discussion sur la faisabilité d'une anticipation des désordres hydrologiques hivernaux.....</b>                            | <b>83</b> |
| 8.1. Les besoins en données météorologiques.....   | 83        |
| 8.2. L'observation des précipitations.....   | 83        |
| 8.3. La prévision des précipitations.....  | 86        |
| 8.3.1. Généralités sur la prévision des précipitations.....  | 86        |
| 8.3.2. Présentation de quelques produits ou méthodes susceptibles de contribuer aux besoins.....                                 | 87        |
| 8.4. Brève analyse de la situation météorologique de quelques événements.....  | 89        |
| <b>9. Conclusion et perspectives.....</b>  | <b>95</b> |
| <b>Références bibliographiques.....</b>  | <b>97</b> |

## **Table des illustrations**

### **Figures**

|  |    |
|--|----|
| Figure 1 : variation du taux de surfaces contributives au ruissellement entre 1989 et 1998 sur quelques bassins versants, d'après (King, 2001).....  | 10 |
| Figure 2 : relations entre survenue d'épisodes turbides et cumuls mensuels de précipitations (d'après Leroy, 1998).....  | 11 |
| Figure 3 : dégradation de l'état de surface initial et formation de la croûte de battance.....   | 14 |
| Figure 4 : synthèse des postes pluviométriques disponibles.....  | 18 |
| Figure 5 : la zone d'étude.....  | 21 |
| Figure 6 : emplacement des sites de mesures du ruissellement et de la pluie suivis par l'AREAS.....  | 24 |
| Figure 7 : périodes de données pluviométriques validées pour les sites de l'AREAS.....   | 29 |
| Figure 8 : exemple d'analyse graphique des cumuls mensuels des postes AREAS (année 1996).....  | 30 |
| Figure 9 : exemple d'analyse graphique ; régression sur les cumuls mensuels.....   | 30 |
| Figure 10 : comparaison entre les moyennes annuelles de précipitations calculées aux postes de références et les moyennes spatialisées (source de ces dernières : Météo-France, présentée dans l'atlas érosion, op. cit.). Les valeurs aux postes sont représentées dans un rectangle, les valeurs associées aux transitions de couleur sont représentées en italique..... | 33 |
| Figure 11 : cumuls mensuels comparés des postes du Hanouard (AREAS) et de Sommesnil (AESN).....  | 35 |
| Figure 12: cumuls mensuels des postes du Hanouard (AREAS) et de Sommesnil (AESN) et droite d'ajustement.....   | 35 |
| Figure 13 : pente de la droite de régression obtenue entre chaque poste et Avremesnil, en superposition des cumuls pluviométriques cartographiés (voir Figure 10). .....   | 37 |
| Figure 14 : périodes de données limnimétriques validées pour les sites de l'AREAS.....   | 39 |
| Figure 15 : hydrogramme et hyétoگرامme brut, Bourville, du 4 au 6 janvier 1998.....  | 41 |
| Figure 16 : hydrogramme unitaire du SCS (SCHWAB et al.,1993, pp 85-87).....  | 41 |
| Figure 17 : hydrogramme découpé en ruissellements élémentaires, Bourville, du 4 au 6 janvier 1998.....   | 42 |
| Figure 18 : débit de pointe spécifique et lame ruisselée des écoulements en vallée sèche (sites équipés par l'AREAS).....  | 43 |
| Figure 19 : Evolution du nombre de périodes CatNat « inondations et coulées boueuses » par an de 1982 à 2001 sur la zone d'étude.....  | 45 |
| Figure 20 : évolution saisonnière du nombre d'événements CatNat.....   | 45 |
| Figure 21 : Evénements de janvier 1995, comparaison entre période CatNat et données pluviométriques de Goderville (la pluie quotidienne est en bleu, le cumul décadaire en rouge). .....   | 46 |
| Figure 22 : emplacement des stations de mesures de débit de la DIREN utilisées dans notre étude.....   | 49 |
| Figure 23 : un exemple de cartographie synthétique (événement du 6 décembre 1992).....   | 53 |
| Figure 24 : répartition mensuelle des épisodes.....  | 56 |
| Figure 25 : répartition saisonnière des désordres hydrologiques.....   | 68 |
| Figure 26 : répartition des classes de lame ruisselée sur le bassin versant de Bourville selon le classement des événements à l'échelle de la zone d'étude, sur la période janvier 1995 – décembre 2000. ....  | 74 |
| Figure 27 : lame ruisselée en fonction de la pluie génératrice et de la pluie du début du jour j-1 jusqu'au début de la pluie génératrice, tous les points disponibles sur les périodes hivernales entre janvier 1993 et décembre 2000.....  | 75 |

|  |    |
|--|----|
| Figure 28 : lame ruisselée en fonction de la pluie génératrice et de la pluie de la décade précédente, tous les points disponibles sur les périodes hivernales entre janvier 1993 et décembre 2000 .....   | 76 |
| Figure 29 : lame ruisselée en fonction de la pluie génératrice et de la pluie de la décade précédente, ruissellements majeurs ( $LR_{pr} \geq 3 \text{ mm}$ ) sur les périodes hivernales entre janvier 1993 et décembre 2000 .....  | 76 |
| Figure 30 : lame ruisselée en fonction de la pluie génératrice et de la pluie de la décade précédente, tous les points disponibles sur les périodes hivernales entre janvier 1993 et décembre 2000, la zone des conditions $\sum_{[j-9;evt[} P + P_{evt} \geq 70 \text{ mm}$ et $P_{evt} \geq 15 \text{ mm}$ est représentée en orangé. .... | 79 |
| Figure 31 : Scénario d'implantation du futur réseau de la DIREN (d'après Helloco, 2002)...   | 85 |
| Figure 32 : la couverture du réseau de radars de Météo-France .....  | 86 |
| Figure 33 : Précipitations observées pendant la décade précédant le 24/10/98 (voir texte pour la légende) .....  | 89 |
| Figure 34 : situation météorologique le 24/10/98 à 0hTU .....  | 90 |
| Figure 35 : Précipitations observées pendant la décade précédant le 25/10/98 .....   | 91 |
| Figure 36 : situation météorologique le 25 octobre à 0hTU .....  | 91 |
| Figure 37 : Précipitations observées pendant la décade précédant le 31/10/98 .....   | 92 |
| Figure 38 : situation météorologique le 31 octobre à 0h.....   | 93 |
| Figure 39 : situation météorologique le 1 <sup>er</sup> novembre à 0h.....   | 93 |
| Figure 40 Précipitations observées pendant la décade précédant le 1/11/98 .....  | 94 |

## Tableaux

|   |    |
|---|----|
| Tableau 1 : Dommages privés dus aux inondations, en millions d'euros (d'après rapport IGE,2001).....  | 12 |
| Tableau 2 : caractéristiques des sites de mesures en vallée sèche de l'AREAS.....   | 25 |
| Tableau 3: surface et occupation du sol des syndicats de bassin versant de la zone d'étude (d'après l'Atlas des bassins versants de Seine-Maritime, DRDAF, 2002) .....  | 26 |
| Tableau 4 : périodes d'exploitation des pluviomètres de l'AREAS.....  | 27 |
| Tableau 5 : carré du coefficient de corrélation pour chaque couple de poste de l'AREAS.....   | 31 |
| Tableau 6 : pente de l'équation de régression pour chaque couple de poste de l'AREAS .....  | 31 |
| Tableau 7 : périodes de fonctionnement des postes AESN et MF (lorsque la période de début était antérieure à 1971, nous avons reporté l'année 1971, l'utilisation de séries trentenaires nous paraissant suffisante)..... | 32 |
| Tableau 8 : moyennes annuelles des précipitations (mm).....   | 32 |
| Tableau 9 : carré du coefficient de corrélation pour chaque couple de poste (MF et AESN confondus).....   | 33 |
| Tableau 10 : pente de la droite de régression pour chaque couple x/y de postes.....   | 34 |
| Tableau 11 : comparaison entre la pente de la régression et la moyenne normalisée.....  | 34 |
| Tableau 12 : paramètres de l'équation de régression entre les poste AREAS et les postes de référence .....  | 36 |
| Tableau 13 : périodes d'exploitation de la limnimétrie sur les sites de l'AREAS .....   | 38 |
| Tableau 14 : recensement des événements ruisselants antérieurs au 01/01/2001 de lame ruisselée $\geq 1 \text{ mm}$ .....  | 43 |
| Tableau 15 : tableau des événements CatNat.....   | 44 |
| Tableau 16 : Synthèse de la base de données établie à partir des informations de la presse ...  | 48 |
| Tableau 17 : stations hydrologiques de la DIREN utilisées pour l'étude ( $Q_n$ est le débit de fréquence de retour n ans) (source : DIREN).....   | 50 |

|  |    |
|--|----|
| Tableau 18 : liste des dates d'événement retenues à partir des débits mesurés par la DIREN ( un tiret (–) correspond à des durées de retour inférieures à $Q_2$ , une croix (X) correspond à une absence de mesure).....   | 51 |
| Tableau 19 : caractéristiques générales des sources d'information utilisées .....  | 52 |
| Tableau 20 : base d'événements de désordres hydrologiques définitive (voir texte pour la légende) .....  | 55 |
| Tableau 21 : Cumuls pluviométriques observés en 3 postes sur la période précédant un événement. La pluie quotidienne $Pl(j)$ et le cumul décadaire $Pl(10j)$ sont reportés (exemple de l'événement du 6/12/1992).....  | 58 |
| Tableau 22 : tableau des correspondances, poste de Goderville. Conditions testées : 80 mm en 10 jours (voir texte pour la signification des colonnes) .....  | 61 |
| Tableau 23 : périodes de cumul de pluie en 10 jours supérieures à 80 mm (Goderville) n'ayant pas de correspondance avec un désordre hydrologique .....   | 62 |
| Tableau 24 : table de contingence pour Goderville (seuil 80 mm en 10 jours) .....  | 63 |
| Tableau 25 : Saint-Laurent, seuil 80 mm sur 10 jours .....   | 63 |
| Tableau 26 : Sommesnil, seuil 80 mm sur 10 jours .....   | 63 |
| Tableau 27 : seuil de 20 mm en 24h, Goderville .....   | 64 |
| Tableau 28 : seuil de 40 mm en 48 h, Goderville .....  | 65 |
| Tableau 29 : seuil de 150 mm en 30 j, Goderville. ....   | 65 |
| Tableau 30 : Goderville, 190 mm en 30 j.....   | 65 |
| Tableau 31 : Goderville, périodes de pluie de plus de 150 mm en 30 jours. ....   | 66 |
| Tableau 32 : caractéristiques des événements sans dépassement de seuil de pluie (voir le texte pour la signification des différentes colonnes).....  | 67 |
| Tableau 33 : analyse des événements de pluie>seuil sans désordre .....   | 68 |
| Tableau 34 : Goderville, seuil de 80 mm en 10 j, mois d'avril exclus.....  | 69 |
| Tableau 35 : Goderville, (seuil et durée pluie initiale : 80 mm et 10j) .....  | 70 |
| Tableau 36 : événements ruisselants remplissant les conditions des ruissellements majeurs (une astérisque marque les événements dont la pluviométrie est reconstituée, les événements de lame ruisselée supérieure à 3 mm sont en gras, ceux survenus en octobre sont en italique) .....   | 80 |
| Tableau 37: estimation de l'évolution des classes de rugosité en fonction des pluies cumulées (d'après BOIFFIN, 1984).....   | 81 |
| Tableau 38 : événements ruisselants enregistrés à Bourville remplissant les conditions des ruissellements majeurs $\sum_{[j-9;evt]} P + P_{evt} \geq 70 \text{ mm}$ et $P_{evt} \geq 15 \text{ mm}$ ou ayant une lame ruisselée supérieure à 3 mm (une astérisque marque les événements dont la pluviométrie est reconstituée) ..... | 82 |

## Introduction générale

Le département de la Seine-Maritime a été ces dernières années fréquemment concerné par des désordres hydrologiques répétés dus à de violents orages estivaux d'une part, et à des pluies hivernales prolongées d'autre part. Ces désordres se sont notamment manifestés par :

- Des débordements répétés de cours d'eau, brefs ou prolongés, occasionnant parfois des pertes en vies humaines, et toujours perturbateurs de la vie quotidienne des habitants et de l'activité économique des zones affectées.
- Une altération de la qualité de l'alimentation en eau potable, ayant pour effet d'empêcher la consommation sur des durées parfois longues.

L'anticipation des phénomènes orageux pose de redoutables problèmes, et parmi les limites actuelles, on peut citer :

- l'état des connaissances scientifiques sur la possibilité de prévoir à quelques heures d'échéance la localisation et l'intensité de la pluie,
- l'organisation d'une chaîne d'alerte susceptible de prendre des mesures adaptées dans des délais extrêmement courts.

**En revanche, l'occurrence des phénomènes hivernaux semblerait pouvoir bénéficier d'une certaine anticipation, comme le suggèrent plusieurs travaux menés notamment par l'INRA sur certains petits bassins du Pays de Caux, et repris récemment par l'AREAS.**

Selon ces travaux, les désordres observés sont très liés aux phénomènes de ruissellement prenant naissance dans certaines conditions d'état de surface des parcelles cultivées (formation d'une croûte de battance). Ils surviendraient plus fréquemment lorsque de nouvelles précipitations font suite à des périodes de pluie prolongées, dont le cumul dépasserait environ 90 mm en moins de 10 jours.

Par ailleurs, si la prévision des précipitations reste toujours un exercice ardu, celle des pluies hivernales rencontre moins de difficultés, dans la mesure notamment où ces pluies d'hiver sont associées à des structures spatio-temporelles plus régulières, et susceptibles d'être prises en compte explicitement dans les modèles de prévision.

Dans ces conditions, la mesure régulière de pluie sur un bassin-versant, de façon à suivre les cumuls de pluie sur quelques jours en cours de constitution, complétée par des prévisions de précipitations sur les heures ou les jours suivants, et une information sur l'état de surface « moyen » des parcelles cultivées, pourraient permettre de constituer des éléments de mise en vigilance pertinents.

Les structures susceptibles de prendre en compte ces informations resteraient à préciser. On peut néanmoins penser que les collectivités locales classiques ou nouvellement créées ainsi que les services de l'Etat seraient très intéressés par la mise à disposition de ces informations.

De plus, les délais caractéristiques de survenue de ces événements, moins « serrés » que dans le cas des phénomènes orageux, restent compatibles avec une prise de décision raisonnée et la mise en place de mesures préventives.

Pour qu'un tel système d'anticipation puisse être mis en oeuvre, il est donc nécessaire de vérifier au préalable les points suivants :

- l'existence d'un seuil de précipitations conduisant, pour des conditions de sol propices, à des désordres hydrologiques ;
- la possibilité d'adapter les prévisions ou les observations des zones de pluie à ce contexte.

L'objectif de cette étude sera de mener une étude de faisabilité sur l'aspect scientifique du projet, et donc de vérifier ces deux premiers points.

Ultérieurement, la possibilité d'organiser un retour d'information correct pour aider les prises de décision aux échelons adéquats pourra être abordée. Ainsi, on disposerait à court terme des éléments techniques et organisationnels nécessaires à la mise en place d'actions d'anticipation des phénomènes pluvieux hivernaux, qui pourraient permettre de réduire leurs effets.

Dans ce rapport final, on s'attachera à développer successivement les points suivants :

- un rappel du contexte général de l'étude, incluant tout d'abord une analyse bibliographique détaillée (il est en effet nécessaire dans un 1<sup>er</sup> temps de recenser et d'analyser les travaux déjà effectués sur le sujet, en particulier ceux de l'INRA et de l'AREAS déjà évoqués dans l'introduction) ; le contexte agro-pédologique du Pays de Caux, qui constitue un élément primordial ici, est ensuite évoqué ;
- le recensement des données disponibles pour l'étude, tant sur le plan de la pluviométrie que des indicateurs de désordre hydrologique ;
- la méthodologie telle qu'elle a été pensée au démarrage de l'étude ;
- l'analyse de chaque type de donnée, avec un exposé de leur méthode de validation le cas échéant, et un aperçu des limites de chacune d'entre elles ;
- le résultat de la comparaison entre les données « hydrologiques » et pluviométriques, et une discussion sur la faisabilité de l'anticipation des désordres hydrologiques hivernaux ;
- dans la perspective d'une éventuelle mise en œuvre d'une anticipation de tel système, un bref exposé des diverses méthodes et produits sur lesquels cette mise en œuvre pourrait s'appuyer.

# 1. Contexte de l'étude

## 1.1. Analyse bibliographique

Les premiers travaux à porter sur ce sujet ont été à notre connaissance publiés par l'INRA (**Papy et Douyer, 1988**), et s'inscrivaient dans la problématique générale de l'érosion des sols agricoles consécutifs au ruissellement. On cherchait ainsi à mieux connaître les déterminants de ces phénomènes, et tout particulièrement à caractériser les conditions susceptibles d'entraîner des ruissellements dits « catastrophiques », en particulier les relations existant entre l'intensité des pluies, la formation des croûtes de surface et la taille de l'impluvium.

Pour cela, les auteurs ont utilisé :

- Les coupures de presse émanant du *Courrier Cauchois*, journal local, pour caractériser la survenue de catastrophes (terme peut-être un peu abusif, mais qui est utilisé tout au long de l'article ; nous parlerons pour notre part « d'événement »), en particulier la date et le lieu de l'événement, pendant la période 1960-1988. Dans la mesure où les correspondants locaux ont peu changé pendant cette période, les auteurs considèrent que la « fidélité » des chroniques a été respectée. Une analyse fine de la localisation des épisodes a également été réalisée, en terme de position dans le bassin-versant : ceci a permis de ne retenir que les événements liés à des inondations ou des coulées de boue dues à des terrains agricoles dominants, sans prendre en compte les débordements de rivières ou les remontées de nappes phréatiques.
- Les données pluviométriques associées, analysées sur une base quotidienne.
- La description des états du sol : il est intéressant de noter sur cette même période une double évolution de l'occupation du sol et de sa perméabilité supposée. Ainsi, de 1960 à 1970, la surface occupée par les prairies naturelles a continué à croître légèrement ; cette tendance s'est ensuite inversée de plus en plus fortement vers la fin de la période ; de même, a été notée la raréfaction progressive des mares, ainsi que l'augmentation de la taille des parcelles.

Au total, 28 épisodes × jours, et 63 épisodes × localités × jours ont ainsi été recensés. Cet échantillon présente une grande variabilité inter-annuelle (plusieurs années consécutives sans événement), mais pas de tendance globale sur la période. La plus grande partie des événements (21) a été liée à des orages, et 7 seulement à des pluies continues. Sans surprise, les événements orageux ont été observés de juin à août, tandis que les épisodes de pluie continue générateurs de problèmes ont été observés entre octobre et décembre (avec une exception en août) ; de ce fait, par commodité, ils ont été par la suite désignés par « événements d'hiver ».

La taille de l'impluvium a semblé jouer un rôle discriminant sur le type d'événement : si les événements orageux peuvent naître sur de très petits impluviums, les événements d'hiver observés ont été engendrés sur des impluviums d'une surface au moins égale à 1600 ha.

Pour ces derniers, et c'est la partie du travail qui nous concerne le plus, les auteurs ont noté qu'ils survenaient dans des conditions de pluviométrie bien précises :

- une pluviométrie excédant 90 mm sur les 10 jours précédant l'événement
- une pluviométrie excédant 15 mm la veille de l'événement.

Néanmoins, ces conditions nécessaires ne paraissent pas suffisantes, puisqu'elles ont été observées plusieurs fois sur la période d'étude sans provoquer de problèmes hydrologiques (notons toutefois que pour les événements hivernaux, seules les données du poste d'Yvetot ont été considérées). Dans ces conditions, les auteurs recommandent de prendre l'état de surface en compte dans l'analyse de la liaison entre les ruissellements intenses.

Enfin, présentant que l'évolution des paysages cultureux semblait s'accélérer au moment où leur travail était publié (en 1988), les auteurs se posaient la question de l'influence de cette évolution sur la fréquence des désordres hydrologiques.

Sur ce premier travail qui a tracé la voie à des réflexions ultérieures, plusieurs remarques peuvent être faites :

- Le nombre de situations d'hiver analysées sur 30 ans reste faible, et sans doute insuffisant pour en déduire les relations état du sol / pluviométrie / désordres hydrologiques, comme le soulignent les auteurs eux-mêmes. De nouvelles analyses sont donc nécessaires, surtout si l'on veut établir *in fine* des relations prédictives et pas seulement un diagnostic.
- Or, la fréquence des désordres hydrologiques a crû dans la décennie suivante (1990-2000), offrant la possibilité d'obtenir un échantillon renouvelé, indépendant du précédent, et plus exhaustif.
- Sans qu'il soit possible d'affirmer à ce stade une relation entre les deux faits, conformément aux observations des auteurs, les paysages ont poursuivi leur évolution sur le Pays de Caux : le taux de surface en prairie, défavorable au ruissellement, n'a cessé de décroître au profit des surfaces cultivées d'une part et des surfaces urbanisées d'autre part. Cette évolution est d'ailleurs indirectement illustrée par la Figure 1, qui représente la variation du taux de surfaces contributives sur la dernière décennie sur quelques bassins :

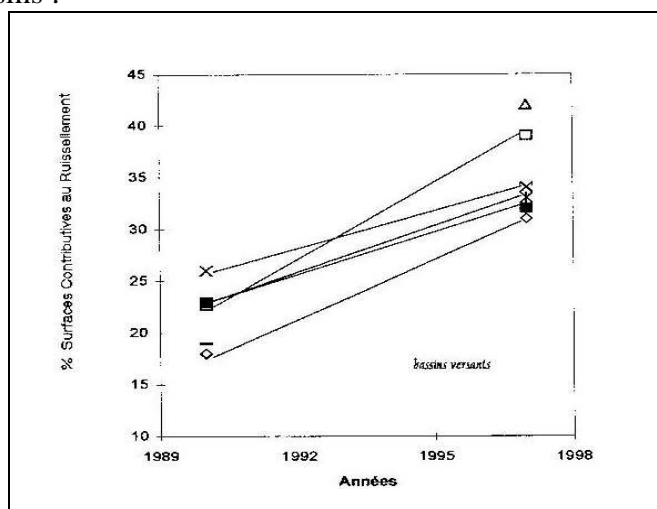


Figure 1 : variation du taux de surfaces contributives au ruissellement entre 1989 et 1998 sur quelques bassins versants, d'après (King, 2001)

- Ceci peut d'ailleurs impliquer que les éventuels seuils de précipitations permettant de déclencher les inondations peuvent également avoir été modifiés au cours du temps.
- Enfin, les seules données pluviométriques utilisées dans cette partie de l'étude provenaient du poste d'Yvetot. Certes, ce poste peut être considéré comme représentatif de la pluviométrie du plateau cauchois, et par ailleurs, les pluies hivernales présentent une certaine régularité spatiale. Néanmoins, on sait que la

pluviométrie varie sensiblement entre le plateau et les zones littorales, alors que des désordres hydrologiques y sont observés de façon fréquente. Dans ces conditions, on doit se poser la question de l'unicité ou non des seuils pluviométriques de déclenchement tels que définis par les auteurs. Pour cela, l'utilisation de pluviomètres représentatifs des différentes zones sera utile.

Dans une perspective voisine, des travaux ont été menés plus récemment à l'AREAS sur la prévisibilité des épisodes turbides (Leroy, 1998). On sait que la structure géologique de la région, fortement karstique, permet l'infiltration de particules solides dans les nappes, lors d'épisodes de ruissellement intense sur les terrains cultivés.

Plus précisément, ce travail s'attachait à rechercher une relation entre la pluviométrie, l'état du sol et l'occurrence de pollution des captages d'eau potable par les phénomènes de turbidité.

Pour cela, la période 1992-1997 a été examinée, en prenant en compte d'une part les données pluviométriques de la station d'Yvetot, et d'autre part les données fragmentaires obtenues auprès de la DDASS, et qui consistaient en une datation approximative des interruptions de service des captages liées à la présence de turbidité.

Malgré ces données difficiles d'emploi, l'étude a permis de recenser 9 périodes turbides. Les relations avec la pluviométrie ont été analysées à plusieurs échelles temporelles :

- A l'échelle mensuelle, on a pu voir que toutes les périodes de forte pluie (> 200 mm) déclenchent des épisodes turbides, les cumuls plus faibles (< 100 mm) n'en déclenchent jamais. C'est ce qu'illustre la figure suivante :

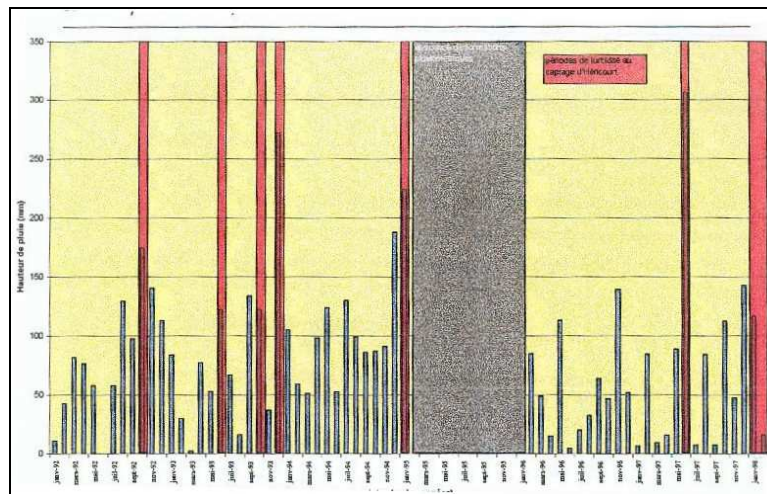


Figure 2 : relations entre survenue d'épisodes turbides et cumuls mensuels de précipitations (d'après Leroy, 1998).

- A l'échelle des données quotidiennes, on a pu mettre en évidence l'existence de seuils pluviométriques, qui variaient en fonction de la saison, et de l'état du sol.
- Enfin, une analyse fine des périodes turbides a été effectuée, et une distinction entre « premiers » et « seconds » épisodes turbides dans la saison dégagée. Une relation entre divers indicateurs pluviométriques (cumuls de pluie sur les 30 jours, 3 jours et la journée précédente) et la date du déclenchement des « premiers » épisodes a été mise en évidence. En revanche, des relations entre la pluviométrie et les « seconds » épisodes n'ont pu être établies.

Dans notre perspective, ces résultats appellent plusieurs commentaires :

- Le phénomène étudié (les épisodes turbides) a probablement la même origine physique que les inondations (existence d'un ruissellement érosif intense sur des surfaces conséquentes), et l'existence de relations avec la pluviométrie confortent notre démarche. Néanmoins, les constantes de temps, en particulier les vitesses de réaction, sont probablement différentes, et l'on ne pourra transposer les indicateurs tels quels.
- Une nouvelle fois, le nombre d'épisodes analysés reste assez faible, notamment les « premiers » épisodes turbides dans la saison, sur lesquels les relations ont été établies ; celles-ci restent donc fragiles. Cette fois-ci, c'est moins le nombre total d'événements qui est en cause, que la difficulté d'obtenir des informations détaillées et précises dans ce domaine « sensible » aux enjeux importants.
- En conséquence, une nouvelle fois, l'analyse spatiale des données pluviométriques a été *de facto* limitée au poste d'Yvetot.

Afin de disposer de données en propre et sur différents secteurs, l'AREAS a mis en place des sites expérimentaux à vocation pérenne, sur plusieurs bassins versants, afin notamment de suivre les phénomènes de ruissellement sur des parcelles bien identifiées. Des pluviomètres automatiques sont installés et des mesures de débit sont ainsi réalisées depuis environ 1995 sur 3 sites (on trouvera des détails au paragraphe 5 du rapport sur les sites, appareils et méthodes de mesure ainsi que sur la qualité des chroniques archivées). A noter que ces sites sont localisés sur des bassins distants de plusieurs kilomètres les uns des autres, où les caractéristiques pluviométriques sont probablement un peu différentes.

Un rapport annuel sur le suivi des sites est régulièrement publié. Nous avons par exemple analysé les rapports concernant les années 1998 et 1999 (**Collange et Cacheleux, 1999** et **Ouvry, Collange et Cacheleux, 2000**). Sur ces deux années, et singulièrement sur la fin de l'année 1999, une succession d'inondations, culminant le 26 décembre 1999, a confirmé sur plusieurs sites que des relations entre cumul des précipitations sur une période de 8 à 10 jours et la survenue d'inondations semblaient effectives. Il reste bien sûr à exploiter de façon systématique ces informations sur les 5 ans de mesure et sur les différents sites. A noter également que les données pluviométriques ont une précision temporelle suffisante pour permettre l'analyse fine des intensités de pluie, lesquelles pourraient également jouer un rôle sur l'érosion des sols, dans certaines conditions de préparation du sol, comme l'indiquent certains travaux plus récents de l'INRA.

Enfin, signalons quelques-unes des principales conclusions figurant dans un très récent rapport de l'Inspection Générale de l'Environnement consacré à cette problématique (**rapport IGE, décembre 2001**). Ce rapport formalise les travaux d'une mission d'inspection commandée par la DPPR (Direction de la Prévention de la Pollution et des Risques, du Ministère de l'Environnement) en novembre 2000 suite aux nombreuses inondations et coulées de boue observées en Seine-Maritime.

L'objectif assigné à la mission était de formuler un plan d'action visant à prévenir le risque lié aux inondations et coulées de boue (les inondations par les crues de la Seine ou par remontées de nappe étaient exclues du champ de l'analyse).

Parmi les données de base recueillies par la mission, une analyse dommages financiers remboursés par les compagnies d'assurances de ces dernières années est fournie (Tableau 1):

| Année    | 1997 | 1998 | 1999 | total |
|----------|------|------|------|-------|
| Dommages | 16   | 3,3  | 41,7 | 61    |

Tableau 1 : Dommages privés dus aux inondations, en millions d'euros (d'après rapport IGE,2001)

Si le document ne permet pas de séparer les dégâts causés par les orages d'été de ceux des pluies d'hiver, il constitue néanmoins un élément de contexte situant bien notre démarche dans une perspective économique claire.

Ajoutons que ces chiffres ne représentent que les dommages remboursés par les assurances aux particuliers au titre du régime CatNat ; les pertes d'exploitations diverses ou les équipements publics n'y sont pas inclus (la mission estime que ces chiffres représentent seulement le quart ou le cinquième des dégâts totaux).

La mission nous a amené à prendre en compte divers travaux effectués sur le sujet (parmi lesquels le rapport de l'INRA que nous avons présenté ci-dessus), à rencontrer divers intervenants nationaux ou locaux (administrations, collectivités, services de l'Etat, laboratoires de recherche, bureaux d'études), et à produire plusieurs observations et recommandations, parmi lesquelles :

- aucune étude fine de la forme des précipitations ne permet de quantifier leur effet sur l'augmentation de la fréquence des événements reconnus au titre des catastrophes naturelles ;
- une étude de ce type avait été faite par l'INRA ; il serait possible d'adopter la même démarche en utilisant les données issues de ce fichier des événements « Cat Nat ».

On voit donc que les recommandations de la mission sont tout à fait convergentes avec le programme d'études que nous nous proposons de réaliser.

## **1.2. Le contexte agro-pédologique**

Il convient de rappeler brièvement les particularités du contexte agro-pédologique qui rend la zone d'étude particulièrement sensible aux phénomènes de ruissellement, même pour des pluies hivernales d'intensité faible.

### **1.2.1. Généralités**

Les sols de la région sont remarquablement homogènes. Il s'agit de sols limoneux épais avec des teneurs en argile variant de 10 à 15% et des teneurs en matière organique de 1 à 1,7% sur les terres labourées. Ces sols représentent la quasi totalité des terres cultivées. Les rares versants pentus des vallées sèches encaissées sont occupés par des bois et des prairies souvent sur des sols de bief à silex et argiles, ou de colluvions avec des limons. Ceci conduit à une homogénéité des états de surface des sols cultivés sur un grand territoire pour une date donnée.

Du point de vue agronomique, ces sols ayant de très fortes potentialités, la grande culture est très développée et là encore très homogène sur les vastes plateaux.

Ces deux grands traits du contexte local montrent l'homogénéité croisée des sols et de l'occupation du sol. Il en résulte une homogénéité des réponses hydrologiques à l'échelle du territoire d'étude en cas de désordres climatiques. Seuls trois paramètres peuvent introduire une variabilité :

- le recul plus ou moins poussé des prairies par bassin versant ;
- la présence plus ou moins marquée de dolines (localement appelées *bétoires*) qui soustraient tout ou partie des ruissellements par engouffrement direct dans le réseau karstique ;
- l'hétérogénéité spatiale des pluies, quoiqu'elle soit généralement faible en hiver.

## 1.2.2. Quelques précisions sur la battance

Ces précisions peuvent être utiles à mieux comprendre la recherche de seuils pluviométriques dans le cadre de cette étude.

Dans le contexte de sols cultivés sur limons battants, comme ceux du Pays de Caux, les variations de l'infiltrabilité seront contrôlées de façon prépondérante par celles de l'état structural de la couche de surface du sol. Cette couche superficielle est fréquemment et intensément soumise aux perturbations d'origine anthropique ou climatique. Les principaux paramètres contrôlant la genèse d'un ruissellement sont :

- l'état de surface du sol (développement et épaisseur de la croûte de battance) ;
- la rugosité (qui contrôle la capacité de stockage dans les flaques superficielles) ;
- la compacité du sol ;
- le taux de couvert végétal ;
- l'état et l'histoire hydrique du sol ;
- la localisation et la densité de motifs imprimés à la surface du sol par le passage des engins agricole.

Tous ces paramètres évoluent rapidement dans le temps avec l'activité agricole et la chronologie des pluies. Les trois premiers ont une évolution particulièrement rapide et importante sur les sols limoneux du Pays de Caux.

## 1.2.3. Evolution de la surface du sol dans le temps

La dernière opération de travail du sol définit un état de surface initial (noté F0), qui est fragmentaire, poreux et meuble, comme l'illustre la Figure 3. Dans ces conditions, la surface du sol a une capacité d'infiltration de l'ordre de 30 à 60 mm/h et une capacité de détention superficielle en eau dépendant de la rugosité de la surface créée par le travail du sol. Deux phases de dégradation de l'état de surface, appelées croûtes de battance, se succèdent alors sous l'action de la pluie (BOIFFIN 1984 ; BRESSON et BOIFFIN 1990) :

### 2 GRANDES ETAPES

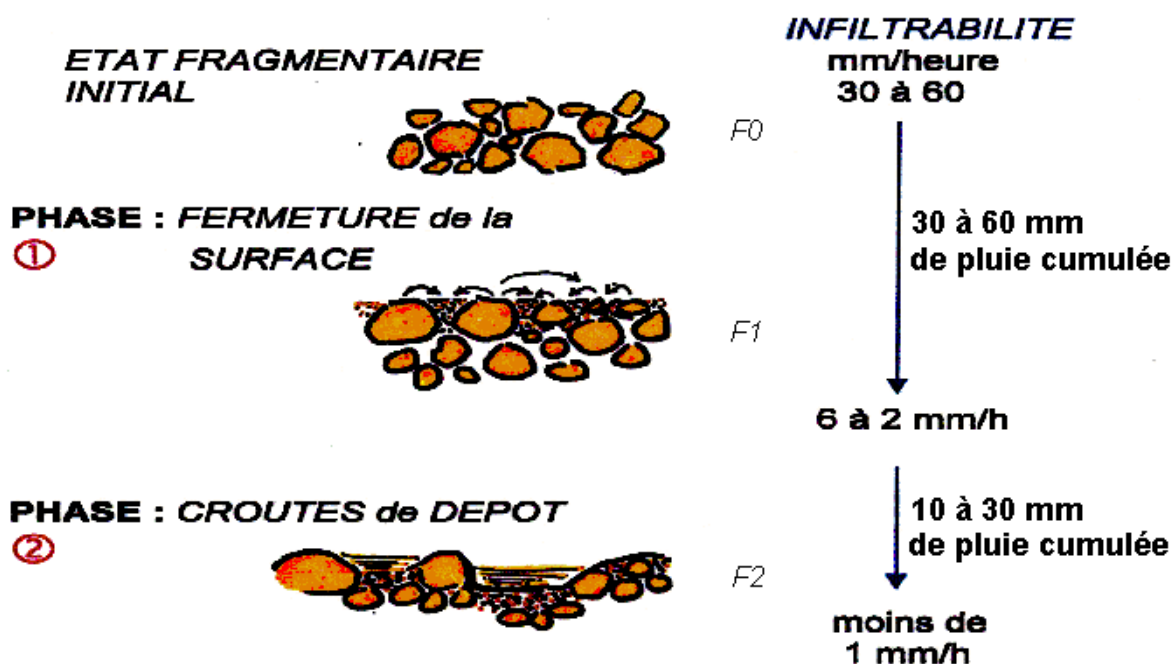


Figure 3 : dégradation de l'état de surface initial et formation de la croûte de battance

### ***une première phase (notée F1)***

Cette phase F1 correspond à la fermeture de la surface du sol par la réduction de la porosité et l'apparition d'une croûte dite structurale de quelques millimètres d'épaisseur. Le colmatage progressif des interstices par des particules fines détachées des mottes et le compactage de l'ensemble sous l'impact des gouttes de pluie, font que la capacité d'infiltration initiale baisse jusqu'à des valeurs comprises entre de 6 et 10 mm/h (BOIFFIN et MONNIER, 1985).

Sur les sols de limons régionaux, la vitesse de formation de cette croûte dépend de deux facteurs :

- la simple somme des pluies cumulées à la surface du sol depuis le travail du sol donnant l'état initial, et
  - l'intensité d'une période de dessiccation entre le travail du sol et la première pluie.
- En conditions hivernales, ce second facteur n'a que peu d'effet.

Pour passer du stade F0 au stade F1, un cumul de 60 mm de pluie est observé en moyenne, mais dans certaines conditions, 30 mm peuvent suffire. Lorsque le cumul atteint 60 à 90 mm, la stade F1 est généralisé sur tous les limons battants cultivés, et la phase suivante commence à se développer.

### ***une deuxième phase (F2)***

Cette deuxième phase se développe dès que l'intensité de la pluie dépasse l'infiltrabilité du sol. Il apparaît alors un excès d'eau à la surface du sol. Les particules détachées des mottes se déposent en phase liquide : la décantation des grains en suspension dans les flaques entraîne un dépôt organisé selon un gradient granulométrique, ce qui le rend quasi imperméable. La croûte est alors qualifiée de *sédimentaire*. La capacité d'infiltration chute alors à moins de 1 mm/h sur un sol limoneux après une longue période pluvieuse.

La formation de ce type de croûte est très rapide. Il suffit de 10 à 30 mm de pluie supplémentaire sur un stade F1 pour que cet état de surface se généralise sur la totalité de la surface du champ.

Ainsi, sur les limons battants du Pays de Caux, pauvres en argile et en matière organique, une centaine de millimètres de pluie suffit en hiver pour passer de l'état initial fragmentaire et poreux à une croûte de battance généralisée F2. Le développement de cette croûte s'accompagne également d'une baisse de la rugosité de la surface du sol.

Des facteurs naturels peuvent à nouveau augmenter l'infiltrabilité des croûtes de battance, soit par la fissuration des croûtes sédimentaires lors du gel ou de la dessiccation (GOVERS 1991), soit grâce aux trous formés par les vers de terre (ROTH et JOSCHKO 1991) et la croissance des végétaux. On parle alors parfois de phase F3.

#### **1.2.4. Spécificités de la période d'octobre à avril**

Sur la période d'octobre à avril, la très grande majorité des sols est nue ou présente un taux de couvert végétal très faible (blé d'hiver). Les parcelles les mieux couvertes seront celles où une interculture a été semée, type moutarde, après céréales.

La compacité du sol peut être très élevée, comme pour les chantiers de récolte de maïs ou de betterave non retravaillés, sur les chantiers de récolte de lin et parfois de pomme de terre et de pois.

Les travaux agricoles en début de période se limitent à la période fin septembre / mi-novembre. Ils concernent en moyenne :

- la préparation et le semis des cultures d'hiver (45% de la surface en moyenne, avec un taux de couvert végétal toujours inférieur à 10%) ;
- les chantiers de récolte de maïs et de betterave (15% de la surface maximum, qui restent en l'état ou retravaillés) ;
- le déchaumage des chantiers de récoltes (35% des surfaces) ;
- les semis d'intercultures (5% des surfaces).

Ces travaux reprennent en mars pour l'implantation des cultures de printemps, avec l'orge de printemps, le pois et le lin, et en avril les betteraves, les pommes de terre et le maïs.

Sauf année exceptionnelle, à partir du mois de novembre et jusque début mars, il a été montré (BOIFFIN *et al.*, 1988, et PAPY et BOIFFIN, 1988) que l'on est pratiquement certain d'avoir soit une croûte de battance généralisée, soit des parcelles très compactées par les opérations de chantier, sans végétation, sur plus de 50% des terres labourées.

## 2. Recensement des données disponibles

### 2.1. Données relatives à la pluviométrie

La partie bibliographique a montré que l'utilisation de données pluviométriques provenant d'un seul poste limitait la capacité d'analyse, en imposant un nombre d'événements trop limité, ou bien en posant des problèmes de représentativité spatiale.

C'est pourquoi nous avons souhaité utiliser l'ensemble des données pluviométriques disponibles sur la zone d'étude. Celles-ci proviennent de plusieurs sources :

- les données de l'AREAS, qui sont des données issues de 3 postes automatiques, capables de mesurer des intensités de pluie sur de très courts pas de temps, et situés sur des bassins-versants instrumentés par ailleurs en mesures de débit. Ces données sont archivées depuis 1995.
- Les données des postes du RPC (Réseau Pluviométrique Complémentaire de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie), actuellement gérées par Météo-France. Ils s'agit essentiellement de postes manuels, qui ne permettent de recueillir que les cumuls quotidiens, entre 6h TU le jour et 6H TU le lendemain. Néanmoins, le poste situé à Goderville est automatisé et permet également de mesurer les intensités de précipitations. La profondeur d'archive accessible par ces postes est variable, mais elle atteint 30 ans pour certains d'entre eux, ce qui permet à la fois de calculer des paramètres climatologiques et d'utiliser toute la profondeur de l'archive CatNat.
- Les données des postes des réseaux de Météo-France, principalement le RCE (Réseau Climatologique d'Etat) aux mêmes caractéristiques que le RPC et les données des postes automatiques (au nombre de 3, légèrement excentrés de la zone d'étude).
- Ponctuellement, des données de postes complémentaires comme ceux du SRPV (Service Régional de Protection des Végétaux), par exemple le poste de Luneray.

Ces postes sont représentés sur la figure synthétique ci-dessous :

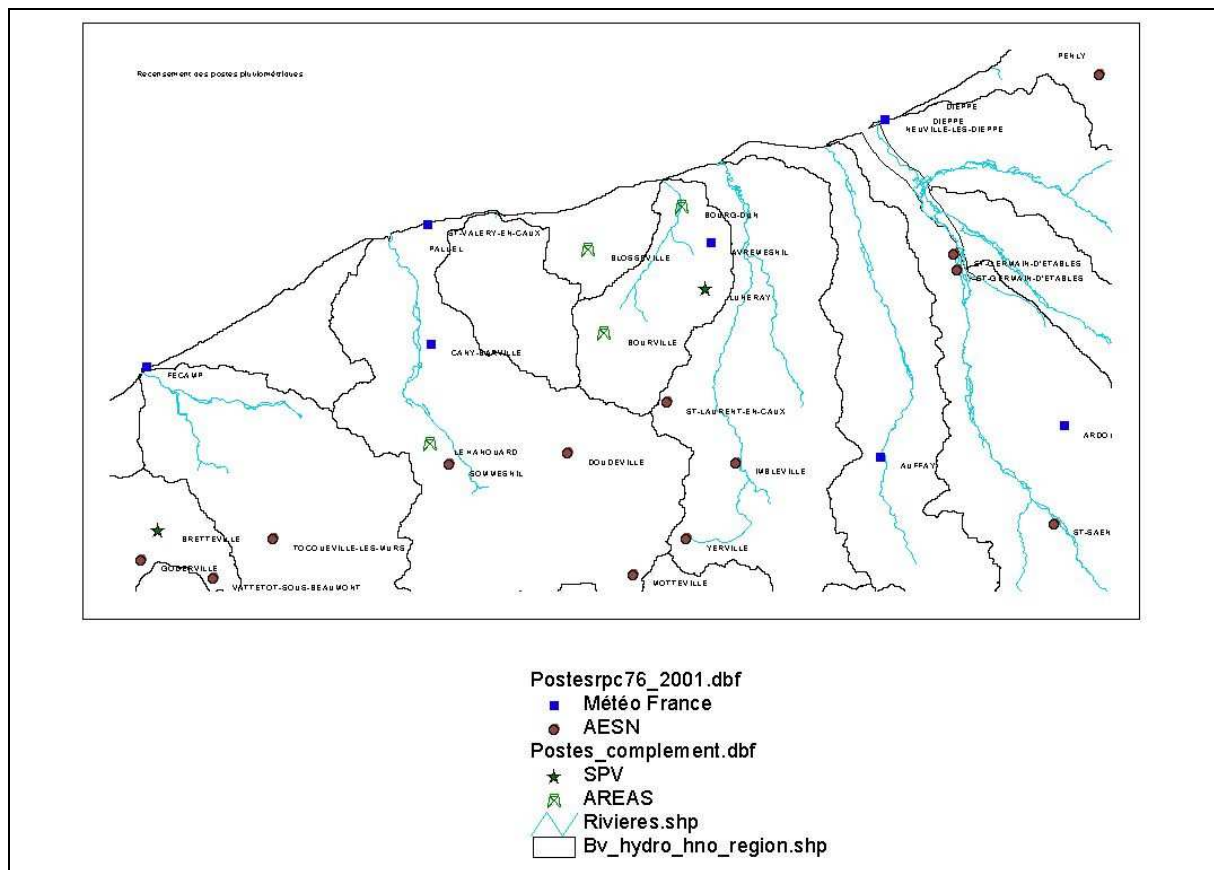


Figure 4 : synthèse des postes pluviométriques disponibles

## 2.2. Données relatives aux désordres hydrologiques

Deux principales sources de données seront utilisées :

### 2.2.1. Les données recueillies par l'AREAS

Il s'agit des mesures de débit effectuées par l'AREAS, sur les sites instrumentés en pluviomètres précédemment mentionnés. On se rapportera au paragraphe 4.1. page 24 pour une présentation de ces sites de mesure.

L'intérêt de ces données est de permettre une évaluation quantitative et continue du ruissellement sur une durée de plusieurs années, probablement sans égal sur la zone d'étude.

### 2.2.2. Les données « CatNat »

Il s'agit des données issues du fichier d'événements ayant donné lieu à des reconnaissances au titre du dispositif d'indemnisation des catastrophes naturelles. C'est pourquoi nous les appellerons dans ce rapport pour simplifier les données « CatNat ».

Ce dispositif, en vigueur depuis 1982, assure l'indemnisation des dégâts privés liés aux événements naturels d'une « intensité anormale ». Lorsque des dégâts dus à certains agents naturels sont observés, la commune a la possibilité de demander au Préfet d'instruire un dossier de reconnaissance au titre de ce dispositif. Divers services de l'Etat sont alors sollicités pour aider à évaluer le caractère anormal de l'événement. Les « inondations et coulées de boue » constituent l'un des agents naturels couverts par le dispositif.

Le fichier est principalement structuré autour du couple commune/date.

Naturellement, ces données doivent être prises avec prudence, et ceci pour plusieurs raisons :

- La vulnérabilité des communes imprime fortement les valeurs : ainsi les villes, où les enjeux économiques et la « fragilité » sont plus importants, paraissent plus fréquemment touchées que les localités rurales voisines.
- Il n'est pas aisé avec ce fichier de distinguer les différentes origines possibles des dommages (crue de rivières ou ruissellement local).
- Enfin, plus le bassin versant est étendu, plus le décalage spatial entre la cause (la pluviométrie) et la conséquence (l'inondation) est susceptible d'être important : par exemple, des crues observées sur le littoral peuvent être engendrées par des précipitations sur le plateau cauchois.
- Dans la mesure où certaines communes ont été fréquemment reconnues en état de catastrophes naturelles, la commission a pu « durcir » son évaluation dans une époque récente, ce qui peut induire un biais dans les données.

Néanmoins, à condition de prendre en compte ces observations, ce type de données nous a semblé constituer au démarrage de l'étude une aide précieuse et relativement maniable dans notre perspective.

### **2.2.3. Autres sources potentielles**

D'autres sources potentielles concernent les désordres hydrologiques :

- Les coupures de presse relatant les principales inondations ; c'est ce type de source qui avait été choisi par l'INRA. En l'occurrence, il s'agissait du Courrier Cauchois. Un recueil des données relatives aux inondations peut être obtenu de ce journal, ainsi que du quotidien Paris-Normandie, dont l'extension géographique est sans doute supérieure.
- Des données de débit sont mesurées par la DIREN Haute-Normandie sur plusieurs bassins-versants du département, avec une longueur d'archive variable.

Au départ, leur utilisation dans l'étude était surtout envisagée en complément de celle des données CatNat.

### **3. Présentation de la méthodologie utilisée au démarrage de l'étude**

Au cours de l'étude, nous avons été contraints d'adapter la méthodologie en fonction de la qualité non suffisante des premiers résultats. Il y a donc eu deux phases méthodologiques.

Le lecteur trouvera ci-dessous la première méthodologie qui a été utilisée au démarrage de l'étude. Sa mise en œuvre est décrite au début du chapitre suivant. A partir de la page 46, les limites atteintes par cette méthode sont exposées. La fin du chapitre 4. présente les sources d'informations complémentaires qui nous ont permis d'atteindre des résultats de qualité satisfaisante. Le chapitre 5. page 52 et suivantes décrit la seconde phase méthodologique et ses résultats.

#### ***3.1. Définition de la période d'analyse et de la zone d'étude***

Rappelons que nous nous intéressons aux événements engendrés par des pluies hivernales, régulières et continues, et qu'il conviendra de ne pas inclure les événements orageux.

Retenir la date comme critère de sélection reste le moyen le plus simple. Certes, des pluies orageuses fortes peuvent se produire jusqu'en octobre, et dès le mois d'avril. Réciproquement des pluies régulières se produisent au cœur de l'été. Toutefois, le réseau pluviométrique dont nous disposons n'est pas assez dense pour conduire une analyse du champ de précipitations et de sa régularité. D'autre part, l'utilisation systématique de moyens complémentaires (localisation des impacts de foudre par le réseau Météorage, analyse des images radar) conduirait à des développements trop volumineux par rapport au bénéfice attendu.

On se limitera donc à l'analyse des pluies se produisant entre le 1<sup>er</sup> octobre et le 30 avril, en gardant à l'esprit que des pluies orageuses peuvent s'y produire, notamment en début et fin de période. Notons qu'elle coïncide également avec la période durant laquelle les problèmes de formation de croûte de battance se font sentir.

En ce qui concerne la zone d'étude, on souhaite étudier les bassins pour lesquels l'influence de la croûte de battance est forte. Concrètement, cela correspond au plateau du Pays de Caux ainsi qu'au Petit Caux, situé plus au nord du département. On exclura néanmoins cette dernière zone, qui n'est pas contiguë à la précédente. En revanche, on inclura dans l'étude les bassins-versants dont l'exutoire peut se situer en limite du plateau, mais pour lesquels l'impluvium se situe sur celui-ci.

Ci-dessous, une cartographie de la zone d'étude finalement retenue :

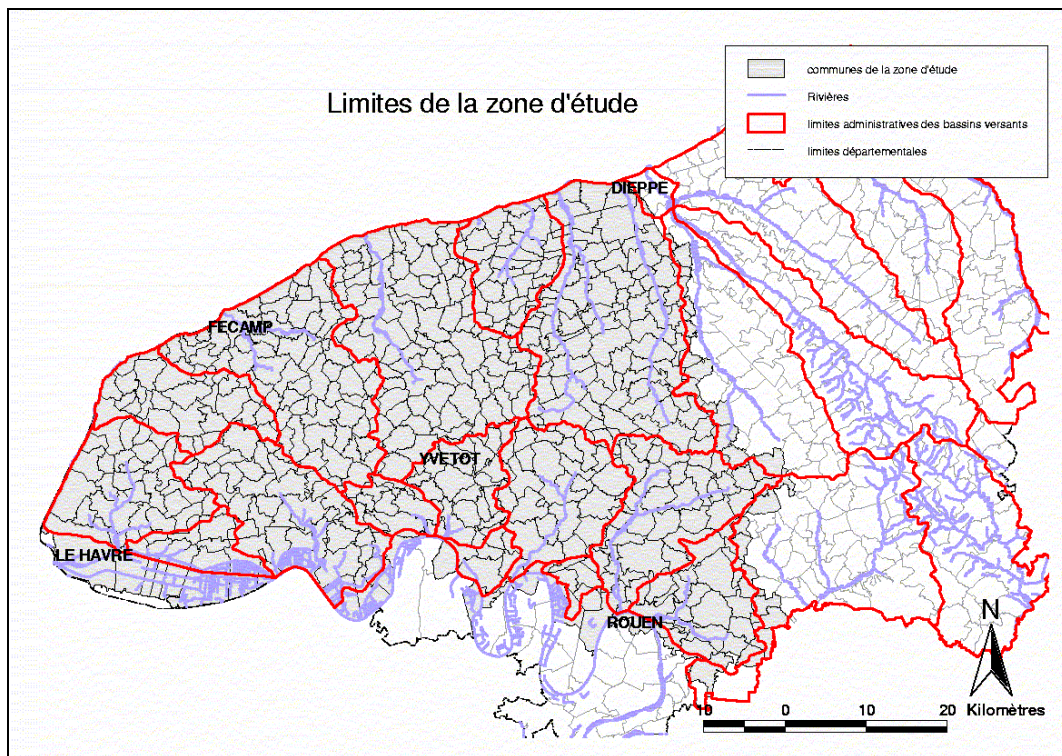


Figure 5 : la zone d'étude

### 3.2. Validations des données pluviométriques

En ce qui concerne les données de pluviométrie, les principaux problèmes sont :

- les questions d'étalonnage pour les postes automatiques, c'est-à-dire ceux de l'AREAS (*a priori*, pour les postes manuels, plus rudimentaires et consistant en un simple récipient gradué, ce problème ne se pose pas).
- Les problèmes de qualité des sites, et notamment la présence d'obstacles à proximité qui, à cause du vent, peut produire d'importantes perturbations.

En ce qui concerne les données gérées par Météo-France, une validation est en principe effectuée en amont, permettant dans certains cas de corriger les données douteuses, ou au moins de les indiquer comme telles.

Pour les données AREAS, dont nous maîtrisons mieux la chaîne de production, des tests et corrections sur l'ensemble des segments de cette chaîne seront effectués. Après ces tests internes, nous procéderons à des comparaisons systématiques des valeurs observées avec celles des postes d'autres producteurs. Ces comparaisons n'avaient pas encore été réalisées, ce type d'analyse permettra de vérifier l'étalonnage des postes AREAS et de détecter les éventuelles dérives au cours du temps.

Pour cela, on comparera les données des postes « aussi proches que possible » des postes AREAS sur la base des cumuls mensuels. En effet, les valeurs au pas de temps quotidien sont trop irrégulières pour servir de comparaison. Au contraire, sur une base mensuelle, les erreurs systématiques éventuelles seront mieux appréhendées.

Toutefois une difficulté méthodologique demeure : l'ensemble du département ne peut être considéré comme climatiquement homogène, et on sait notamment qu'un gradient fort (jusqu'à 30% d'écart sur les moyennes annuelles de précipitations) existe entre les régions proches du littoral et celles situées sur le plateau. Par conséquent, il faudra aussi prendre en

compte ces différences dans la comparaison entre postes, afin de faire la part entre les écarts dus à des climatologies différentes et ceux résultant de problèmes de mesure.

On effectuera pour cela une analyse des moyennes climatologiques sur la période la plus récente (1970-2000), à partir des séries disponibles des postes du RPC et du RCE.

### **3.3. Exploitation des données pluviométriques**

A partir des données quotidiennes observées sur l'ensemble des postes, on calculera les cumuls glissants sur l'ensemble des durées mises en évidence lors de l'étude bibliographique : 1 jour, 3 jours, 8 jours, 10 jours, 30 jours. Pour chacune des durées, les cumuls seront comparés à des valeurs seuils correspondantes. Ces seuils seront dans un 1<sup>er</sup> temps choisis voisins de ceux définis par Papy et Douyer ; ils pourront évoluer par la suite.

Ainsi, on aura constitué un échantillon d'événements, pour chaque poste, où les conditions de dépassement des seuils seront satisfaites. Cette base d'événements sera ensuite confrontée à la base d'événements hydrologiques.

### **3.4. Exploitation des données CatNat**

Rappelons que ces données sont présentes sous la forme de couples date-commune. La 1<sup>ère</sup> étape consistera à recenser les événements, en agrégeant l'ensemble des déclarations des différentes communes pour la même date. On constituera ainsi une première base d'événements.

Ceci nous permettra de disposer d'une base d'événements affinée.

Pour chacun de ces événements, on essaiera ensuite de déterminer la cause possible (débordement de rivières, ruissellements, ...) par une analyse spatiale réalisée à partir des cartographies des communes indemnisées, et de leur position par rapport aux bassins versants et aux cours d'eau. On utilisera pour cela des représentations cartographiques par logiciel d'information géographique.

### **3.5. Comparaison entre la base d'événements pluviométriques et la base d'événements CatNat**

Dans cette partie, on procédera à la comparaison des deux bases d'événements. On déterminera en particulier la table de contingence comprenant les éléments suivants :

- nombre d'événements communs aux deux bases ;
- nombre d'événements satisfaisant aux critères de seuil pluviométrique et absents de la base de données CatNat ;
- nombre d'événements présents dans la base de données CatNat mais ne satisfaisant pas aux critères pluviométriques.

Pour les deux derniers cas, on cherchera à établir si l'état du sol peut fournir une explication à l'absence de corrélation. On pourra le cas échéant procéder à des modifications des valeurs de seuils pluviométriques pour améliorer les relations.

### **3.6. Utilisation de la base d'événements AREAS**

Les données AREAS permettent des mesures précises et à pas de temps fin de pluviométrie et de ruissellement sur quelques bassins-versants de petite taille. On procédera comme ci-dessus à la comparaison entre ces deux types de mesure, en définissant les dates satisfaisant aux critères pluviométriques (dépassement d'un seuil sur une durée donnée) et hydrologiques (dépassement d'un seuil de lame d'eau ruisselée).

On disposerait ainsi de deux types de comparaison, l'une sur l'ensemble de la zone d'étude et une certaine profondeur d'archive, mais dont la précision spatio-temporelle est limitée (données CatNat et postes pluviométriques), l'autre étant valable sur seulement quelques km<sup>2</sup>, mais permettant une analyse fine (base de données AREAS).

## 4. Validation et analyse de chaque type de donnée

### 4.1. Les sites de mesures de l'AREAS

Depuis 1988, l'AREAS a participé à l'exploitation de plusieurs sites de mesures, dont certains en collaboration avec la DIREN.

#### 4.1.1. Localisation et caractéristiques

Les sites ont été implantés de façon à appréhender les phénomènes de ruissellement sur le Pays de Caux à différentes échelles. La Figure 6 présente l'emplacement des sites de mesures, les limites de bassin versant, les talwegs principaux, et le Tableau 2 donne les principales caractéristiques des bassins versants suivis.

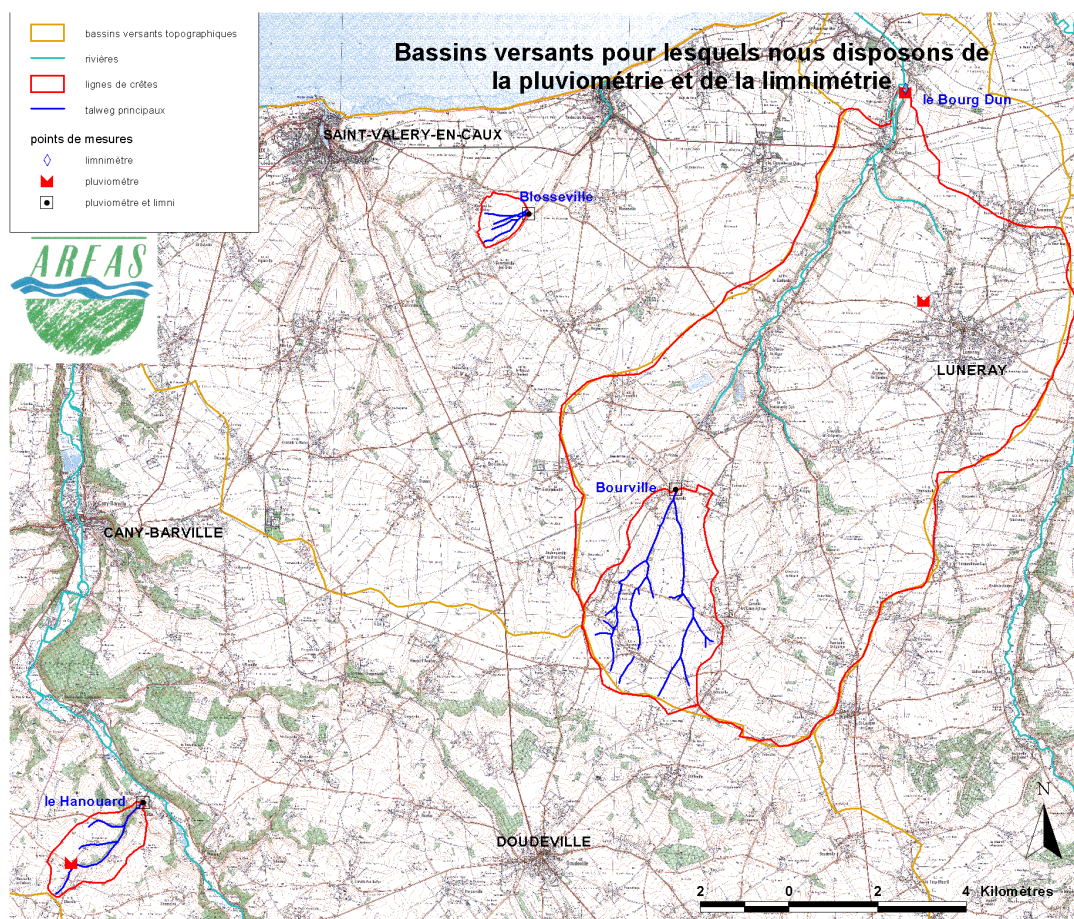


Figure 6 : emplacement des sites de mesures du ruissellement et de la pluie suivis par l'AREAS

| <b>bassin versant</b>                                 | <b>Blosseville – seuil jaugeur</b>      | <b>le Hanouard</b>  | <b>Bourville</b>   |
|---|---|---|--|
| période de fonctionnement                             | octobre 1988 – décembre 2002            | août 1994 – décembre 2002   | janvier 1995 – décembre 2002   |
| superficie du bassin versant (ha)                     | 89                                      | 270   | 1100   |
| pente moyenne du talweg                               | 2,0 %                                   | 3,3 %   | 1,5 %  |
| proportion en terre labourée                          | 100,0 %                                 | 51,3 %  | 79,0 %   |
| proportion en herbe                                   | 0,0 %                                   | 27,4 %  | 9,5 %  |
| proportion en bois                                    | 0,0 %                                   | 12,2 %  | 0,5 %  |
| proportion en zones ± bâties                          | 0,0 %                                   | 8,3 %   | 10,0 %   |
| proportion en routes                                  | 0,0 %                                   | 0,8 %   | 1,0 %  |
| surface potentiellement ruisselante (ha) <sup>1</sup> | 89                                      | 196   | 1000   |
| types de sols sur les terres labourées                | limons battants                         | limons battants et limons peu épais à silex   | limons battants  |
| année de référence pour l'occupation du sol           | 1994                                    | 1994  | 1994   |
| nombre de parcelles (mars 2003)                       | 23                                      | 37  | 145  |
| particularités  | pas de réinfiltration de long du talweg | <ul style="list-style-type: none"> <li>• la plupart des talwegs en herbe ou bois,</li> <li>• infiltrations karstiques importantes,</li> <li>• présence de bassins de retenue depuis 1996 (3300 m<sup>3</sup> au total)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• des talwegs en herbe,</li> <li>• quelques infiltrations karstiques</li> </ul> |

Tableau 2 : caractéristiques des sites de mesures en vallée sèche de l'AREAS

#### 4.1.2. Schéma d'ensemble

Chaque site de mesure est équipé du matériel nécessaire à l'acquisition de valeurs de précipitation et de ruissellement.

La présentation du fonctionnement de ces stations se trouve en annexe 1.

#### 4.1.3. Représentativité de ces trois sites

Comme on le voit sur le Tableau 2, les trois sites en vallée sèche équipent des bassins versants assez différents de par leurs surfaces, leurs occupations du sol et leurs particularités.

<sup>1</sup> somme des surfaces en terres labourées, bâties et routes

Le site de Blosserville draine un micro-bassin versant. Avec ses 89 ha tout en culture et ses 23 parcelles, il rend bien compte des phénomènes se produisant à l'échelle de quelques parcelles. Les mesures qui y sont faites ne sont peut-être pas généralisables à des surfaces plus grandes.

Le bassin versant du Hanouard montre une occupation du sol particulière avec beaucoup de prairies et de bois. Cependant, sa taille encore relativement modeste avec 138 ha en culture, l'existence de fortes infiltrations karstiques (bétoires) le long du talweg principal, couplées à la présence de bassins de retenue, rendent la généralisation de ses résultats difficilement extrapolables à de surfaces plus grandes.

Quant au bassin versant de Bourville, ses caractéristiques le rapprochent des bassins versants du département présentés dans le Tableau 3, de par sa taille, son grand nombre de parcelles, son occupation du sol, la présence de zones urbanisées et de routes, et d'un karst faiblement actif.

**Pour toutes ces raisons, dans la suite de cette étude, nous nous intéresserons en priorité aux résultats des mesures issues de ce bassin versant de Bourville, et au besoin nous compléterons avec les résultats des deux autres bassins versants.**

| Nom du bassin versant       | Surface totale (ha) | Pourcentage de la surface totale du bv |                  |                  |                  |
|-----------------------------|---------------------|--|------------------|------------------|------------------|
|                             |                     | Surface agricole                       |                  |                  | Surface en forêt |
|                             |                     | Totale                                 | Surface labourée | Surface en herbe |                  |
| LEZARDE                     | 21816               | 59,2                                   | 46,7             | 12,4             | 2,5              |
| ETRETAT                     | 15957               | 76,0                                   | 58,4             | 17,6             | 5,5              |
| VALMONT-GANZEVILLE          | 36254               | 76,2                                   | 58,5             | 17,7             | 6,4              |
| DURDENT-ST VALERY           | 50063               | 79,8                                   | 59,1             | 20,8             | 6,0              |
| DUN                         | 15138               | 82,6                                   | 67,2             | 15,5             | 1,9              |
| <i>Sous BV de Bourville</i> | <i>1 100</i>        | <i>88,5</i>                            | <i>79,9</i>      | <i>9,5</i>       | <i>0,5</i>       |
| SAANE-VIENNE-SCIE           | 53057               | 78,8                                   | 57,6             | 21,2             | 7,0              |
| ROBEC                       | 16115               | 48,4                                   | 34,0             | 14,4             | 19,4             |
| CAILLY                      | 24576               | 55,1                                   | 36,2             | 18,9             | 22,7             |
| ST MARTIN DE BOSCHERVILLE   | 2678                | 44,1                                   | 24,5             | 19,7             | 33,1             |
| AUSTREBERTHE                | 21558               | 72,7                                   | 47,9             | 24,8             | 11,0             |
| VAL DES NOYERS              | 3930                | 41,4                                   | 26,3             | 15,1             | 35,2             |
| RANCON-FONTENELLE           | 12171               | 66,7                                   | 43,3             | 23,4             | 15,4             |
| STE GERTRUDE                | 5697                | 56,9                                   | 36,2             | 20,7             | 26,3             |
| COMMERCE-VIVIER-THELUET     | 27907               | 65,0                                   | 45,4             | 19,6             | 11,6             |
| LOUDALLE                    | 7400                | 48,5                                   | 31,7             | 16,8             | 6,7              |
| <b>ENSEMBLE DE LA ZONE</b>  | <b>314317</b>       | <b>63,4</b>                            | <b>44,9</b>      | <b>18,6</b>      | <b>14,0</b>      |

Tableau 3: surface et occupation du sol des syndicats de bassin versant de la zone d'étude (d'après l'Atlas des bassins versants de Seine-Maritime, DRDAF, 2002)

## 4.2. Analyse des postes pluviométriques de l'AREAS

### 4.2.1. Validation des données

Pour disposer de l'information la plus fiable et la plus cohérente possible, nous avons choisi de partir des données brutes dont nous disposons, et d'effectuer toutes les démarches nécessaires à la validation de ces données.

Le tableau 4 montre les périodes de fonctionnement des différents pluviomètres de

l'AREAS. Sur ces postes, la pluviométrie est connue avec la plus grande précision possible offerte par des pluviomètres à auget : on connaît jusqu'à l'intensité instantanée.

| Nom du site                 | Début d'exploitation de la pluviométrie | Fin d'exploitation de la pluviométrie |
|-----------------------------|---|---------------------------------------|
| Blosseville – seuil jaugeur | avril 1988                              |                                       |
| Blosseville – canal Venturi | avril 1988                              | avril 1996                            |
| le Hanouard                 | août 1994                               |                                       |
| le Bourg Dun                | mars 1995                               | janvier 2000                          |
| Luneray – le Buquet         | mars 1995                               | mars 1997                             |
| Bourville                   | juillet 1995                            |                                       |
| Cleuville                   | janvier 2002                            |                                       |

Tableau 4 : périodes d'exploitation des pluviomètres de l'AREAS

On voit que la période la plus intensive de mesure pluviométrique commence en 1995. Comme on le verra par la suite, plusieurs chroniques sont nécessaires pour valider l'information pluviométrique. Les données du RPC dont nous disposons n'allant pas au delà de l'année 2000, la période de validation a été limitée à 1995-2000. Les postes concernés, de part l'étendue de leur chronique sur la période, sont donc ceux Blosseville – seuil jaugeur, le Hanouard, le Bourg Dun, et Bourville.

Une fois toutes les données brutes collectées et identifiées, le travail de validation des données disponibles a été engagé.

Les enregistrements disponibles ne sont pas parfaits. Les événements pouvant survenir pour perturber la mesure de la pluie et son enregistrement sont nombreux et variés.

Le travail de validation consiste à identifier les périodes où la grandeur mesurée est parfaitement connue, et les autres périodes. Nous avons décidé de ne conserver que les périodes dont les enregistrements sont les meilleurs possibles. Pour toutes les autres périodes, on considère l'information comme absente. Les périodes dont les mesures étaient partielles (par exemple lorsque le pluviomètre était partiellement bouché) ont toutes été éliminées.

Pour identifier ces périodes, le plus efficace est de disposer d'informations sur l'état de fonctionnement du matériel de mesure : les métadonnées. Croiser différentes sources d'information est aussi utile.

#### *Utilisation des métadonnées disponibles*

Ces métadonnées prennent la plupart du temps la forme de *cahiers de suivi*, dans lesquels sont consignés tous les événements notables de la vie du site de mesure. La mémoire de l'opérateur peut aussi être sollicitée.

#### *Elimination des périodes douteuses*

Pour compléter l'étape précédente, on vérifie la cohérence des chroniques de pluies entre elles. Tout en tenant compte de la variabilité spatiale des pluies, un fonctionnement défaillant de la part d'un pluviomètre sur plusieurs jours sera visible si le signal enregistré est significativement différent de celui donné par les pluviomètres voisins, surtout lorsque ceux-ci présentent une faible variabilité entre eux.

Un programme informatique a été spécialement développé pour faciliter cette comparaison d'une chronique à toutes les autres.

Cette étape nous a permis d'identifier plusieurs périodes douteuses, et d'écartier ces données. L'hypothèse la plus fréquemment invoquée pour expliquer ces périodes douteuses est une obstruction totale ou partielle du pluviomètre. Quelques problèmes d'artefacts sont aussi à noter, dus à la mécanique des augets.

### *Comparaison avec des travaux antérieurs*

Au terme de ces étapes de validation, on dispose de données élaborées, qu'il est alors possible de comparer à celles issues de travaux antérieurs effectués sur une partie des données brutes ici utilisées. Cela a été en particulier le cas avec les données de la thèse de Véronique Lecomte, portant sur les années 1995 à 1998. L'intérêt de ces données est qu'elles ont été traitées par les personnes qui avaient en charge la maintenance des sites de mesures.

La grande cohérence constatée a été un élément supplémentaire pour qualifier de *valides* les chroniques de pluie ainsi obtenues. Nous pouvons alors dire disposer de chroniques de pluie cohérentes pour chaque station.

### *Descriptions des chroniques obtenues et format des données*

Un fichier unique, appelé *fichier de chronique*, permet de stocker l'information élémentaire d'un pluviomètre à auget : il présente les caractéristiques du site de mesure et de son équipement, et donne la liste des dates auxquelles l'auget a basculé.

Après traitement de ce fichier, on obtient, à côté du fichier de chronique contenant les données validées du pluviomètre :

- un fichier contenant les intensités pluvieuses instantanées ;
- un fichier contenant les précipitations horaires ;
- un fichier contenant les précipitations journalières ;
- un fichier contenant les précipitations mensuelles ;
- un fichier décrivant chaque pluie élémentaire.

Nous avons convenu d'appeler *pluie élémentaire* un ensemble de précipitations continu dont toutes les intensités instantanées sont supérieures à  $0,6 \text{ mm.h}^{-1}$ . Disposant de pluviomètres à auget d'une capacité de  $0,2 \text{ mm}$ , on sait que chaque date enregistrée marque une bascule de l'auget, qui traduit une précipitation de  $0,2 \text{ mm}$  depuis la dernière bascule. Une pluie élémentaire est donc constituée des bascules d'auget distantes de moins de 20 minutes entre elles.

Naturellement les fichiers horaire et journalier respectent les conventions de Météo France (datations en temps universel, début de journée à 6 heures TU). Nos données peuvent donc être directement comparées à celles fournies par cette institution.

### *Les chroniques obtenues*

Dans le cadre de cette étude, la validation des données n'a porté que sur la période allant de janvier 1995 à décembre 2001, un nombre suffisant de chroniques en parallèles étant nécessaires pour pouvoir éliminer les périodes douteuses.

La Figure 7 montre les plages temporelles sur lesquelles des données validées sont disponibles pour les cinq sites présentant une bonne couverture de la période de validation.

On remarque des périodes d'absences de données à l'intérieur des périodes d'exploitation des pluviomètres parfois assez importantes. Par exemple celles du Hanouard entre septembre 1999 et février 2000 est due à un problème mécanique sur le pluviomètre, et celle de mai 2000 à janvier 2001 sur le même site est le fait d'une erreur informatique.

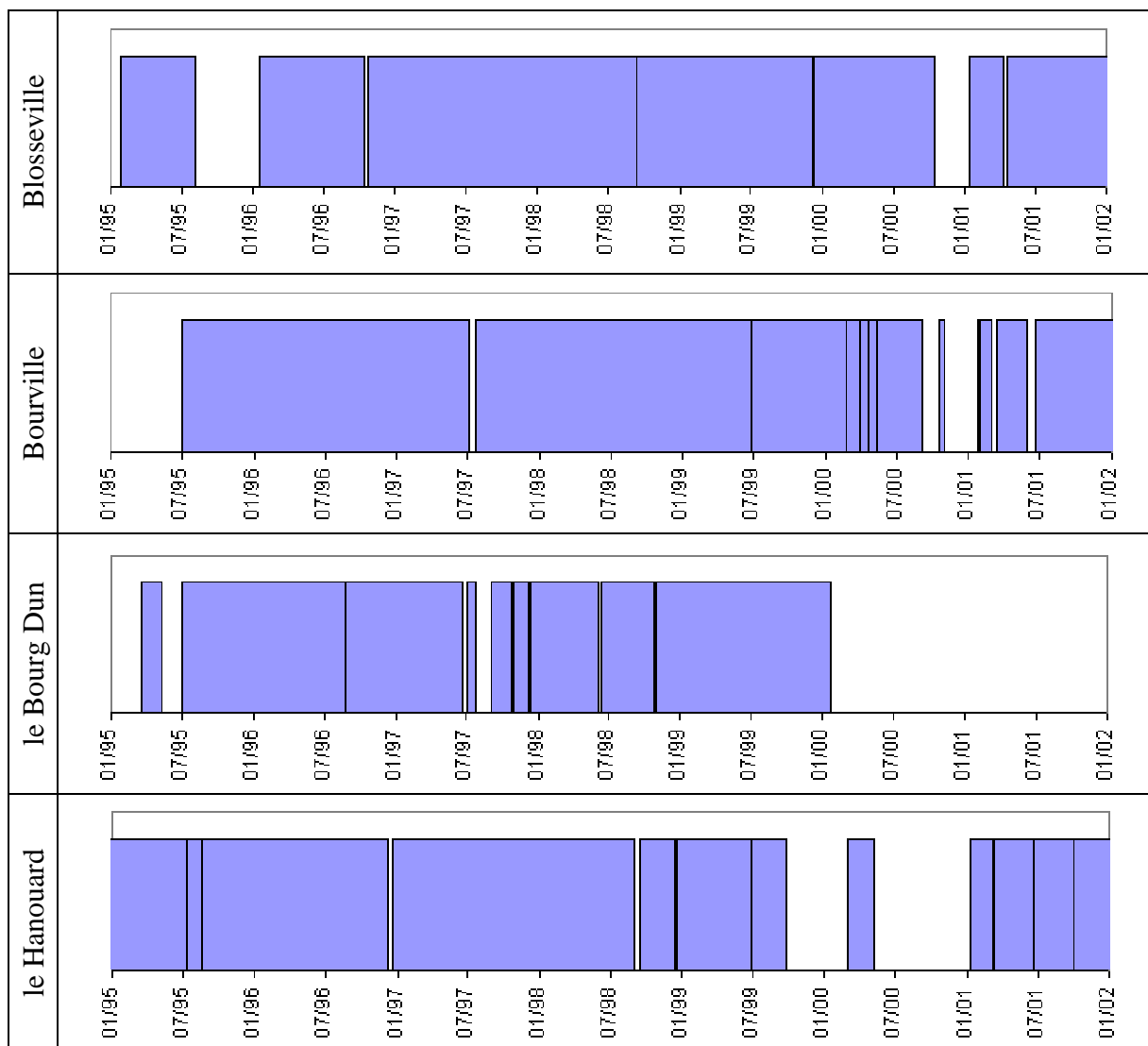


Figure 7 : périodes de données pluviométriques validées pour les sites de l'AREAS

#### 4.2.2. Comparaison des données de cumul mensuel des postes AREAS

La cohérence interne des données a été analysée à partir des cumuls mensuels observés pendant cette période 1995-2000. On choisit les cumuls mensuels parce que la dynamique de cette donnée est bonne (ce qui facilite l'analyse des corrélations), et qu'un nombre de point suffisant est obtenu (40 à 50 sur la durée). Tous les mois où au moins deux jours de données sont absents sont éliminés de l'analyse. On utilise d'une part les sorties graphiques brutes (sous forme d'histogrammes) et d'autre part la régression linéaire pour chaque couple de postes (cette procédure a été préférée à la comparaison des cumuls, car elle nous a semblé mieux adaptée au grand nombre d'absences de données). La droite de régression est contrainte de passer par l'origine.

A titre d'exemple, on montre ci-dessous l'histogramme relatif à la comparaison des postes sur l'année 1996 (qui est celle qui présente le meilleur taux de données disponibles).

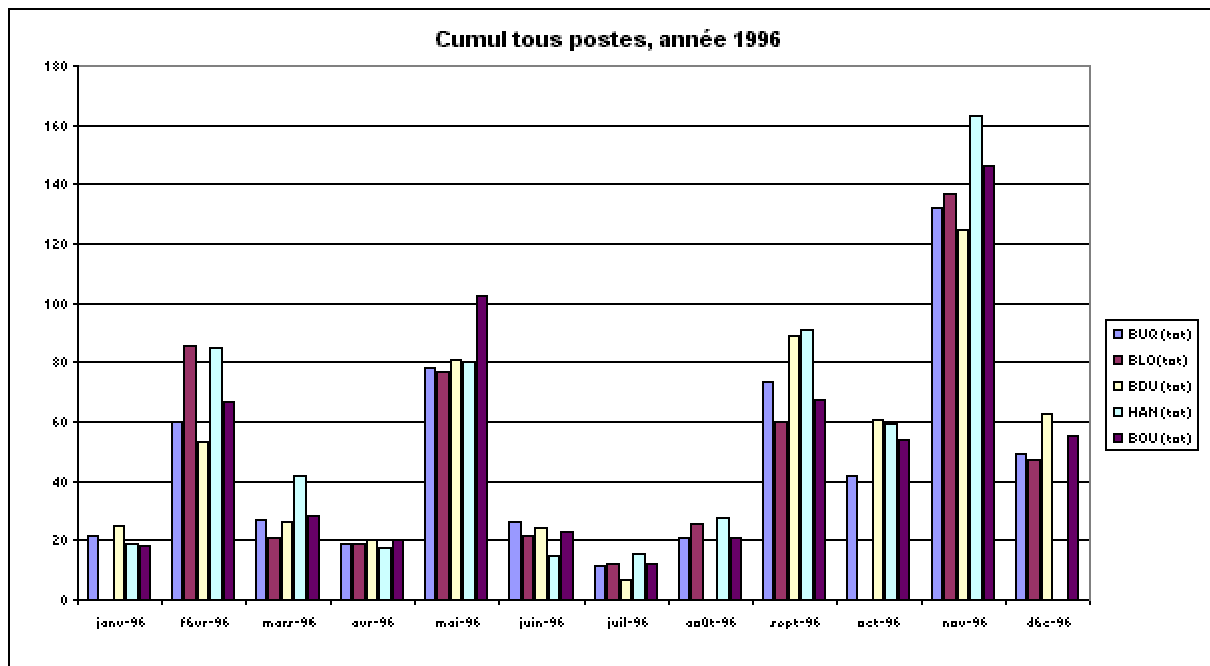


Figure 8 : exemple d'analyse graphique des cumuls mensuels des postes AREAS (année 1996)

Sur cette figure, la similarité des comportements est globalement satisfaisante. Néanmoins, l'analyse des petites différences entre postes n'est pas aisée.

C'est pourquoi on aura également recours à des comparaisons entre postes sous forme de nuages de points sur l'ensemble de la période (un point représentant ici un cumul mensuel).

A titre d'exemple, le graphique suivant représente la comparaison entre les données mensuelles de Bourville et Bourg-Dun. On y ajoute également la droite de régression  $y = a \cdot x$  (donc assujettie à passer par l'origine) ainsi que l'équation correspondante.

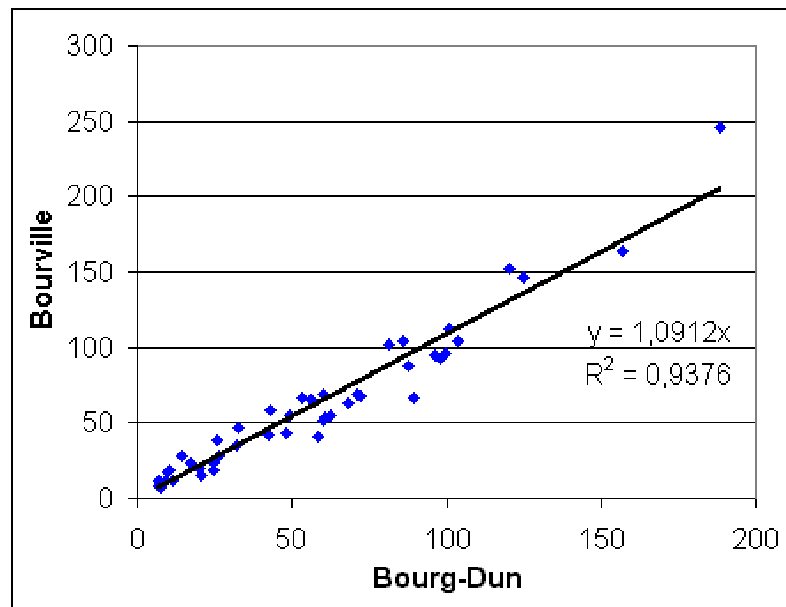


Figure 9 : exemple d'analyse graphique ; régression sur les cumuls mensuels.

L'accord entre les deux séries de données est bon, et le carré du coefficient de corrélation atteint près de 0,94. Toutefois la pente de la droite d'ajustement atteint 1,09, indiquant des valeurs supérieures pour Bourville.

La même analyse a été effectuée sur l'ensemble des couples de postes AREAS. On retiendra principalement ici les deux valeurs numériques : carré du coefficient de corrélation, valeur de la pente de régression, qui sont rassemblées dans les tableaux suivants :

|             | Bourg-Dun | Blosseville | Bourville | Le Hanouard |
|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|
| Bourg-Dun   |           |             |           |             |
| Blosseville | 0,89      |             |           |             |
| Bourville   | 0,94      | 0,91        |           |             |
| Le Hanouard | 0,87      | 0,91        | 0,86      |             |

Tableau 5 : carré du coefficient de corrélation pour chaque couple de poste de l'AREAS

La corrélation reste bonne pour l'ensemble des couples, avec un carré compris entre 0,86 et 0,94. Il semble néanmoins que la corrélation soit un peu plus faible avec le Hanouard. Ceci peut, au moins en partie s'expliquer par la position un peu excentrée de ce poste par rapport aux autres.

Une bonne liaison statistique entre l'ensemble de ces couples de postes étant acquise, la pente de la droite de régression est donc également pertinente. Elle est reportée au tableau suivant :

| X \ Y       | Bourg-Dun | Blosseville | Bourville | Le Hanouard |
|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|
| Bourg-Dun   |           |             |           |             |
| Blosseville | 0,95      |             |           |             |
| Bourville   | 0,92      | 0,94        |           |             |
| Le Hanouard | 0,88      | 0,95        | 1,00      |             |

Tableau 6 : pente de l'équation de régression pour chaque couple de poste de l'AREAS

Les pentes des droites de régression montrent que les valeurs semblent croître selon l'ordre suivant : Bourg-Dun, Blosseville, Bourville et le Hanouard. Les valeurs obtenues sont bien cohérentes avec une augmentation régulière des pluies de la côte vers l'intérieur. L'écart entre les postes demeure cependant faible, de l'ordre de 12 % au maximum. Néanmoins, on pourrait s'attendre à ce que les valeurs soient un peu plus élevées vers le Hanouard, poste situé plus à l'intérieur et plus à l'ouest, alors qu'elles restent voisines de celles observées à Bourville.

Si la cohérence interne des postes de l'AREAS est maintenant établie, il reste à comparer leurs valeurs à celles des postes voisins d'autres producteurs de données.

### **4.3. Analyse des postes Agence de l'Eau Seine-Normandie et Météo-France**

Sur la région concernée, les postes suivants sont plus particulièrement utiles (voir la cartographie de la Figure 4 page 18) :

- deux postes de l'Agence de l'eau Seine-Normandie (AESN) : Sommesnil, très proche du Hanouard, et Saint Laurent en Caux, en amont des 3 autres ;
- deux postes de Météo-France (MF) : Avremesnil, proche de Bourg-Dun et Blosseville, et Cany-Barville, à proximité du Hanouard.

Tous ces postes sont des postes non automatisés, ce qui permet une certaine robustesse vis-à-vis des problèmes d'étalonnage que peuvent rencontrer les postes automatiques. A ce titre, ils peuvent servir de données de référence lorsqu'on utilise des valeurs de cumul mensuels. Néanmoins, la qualité des mesures reste soumise aux contraintes générales de qualité des sites pluviométriques.

Un second intérêt de ces postes est d'avoir été installés depuis beaucoup plus longtemps que les postes AREAS, et de présenter de longues séries de données traitables numériquement, comme le montre le Tableau 7 ci-dessous :

| Nom du poste          | Propriétaire | Période disponible           |
|-----------------------|--------------|------------------------------|
| Saint-Laurent en Caux | AESN         | Janvier 1972 - décembre 2000 |
| Sommèsnil             | AESN         | Janvier 1985 - octobre 2000  |
| Avremesnil            | MF           | Janvier 1971 – décembre 2000 |
| Cany-Barville         | MF           | Janvier 1971 – décembre 2000 |

Tableau 7 : périodes de fonctionnement des postes AESN et MF (lorsque la période de début était antérieure à 1971, nous avons reporté l'année 1971, l'utilisation de séries trentenaires nous paraissant suffisante).

Nous avons pu constater que le fonctionnement de ces postes était à peu près continu sur ces périodes, même si ponctuellement des données étaient reconstituées, ce qui n'affecte pas en principe les valeurs des cumuls mensuels.

Nous disposons ainsi de 4 séries de données, sur une base de 15 ans (Saint Laurent), ou 30 ans (pour les autres postes), et sommes en mesure de calculer les normales climatologiques annuelles les plus récentes. Le calcul des moyennes sur cette période permet en particulier d'intégrer les années 1995-2000, fertiles en inondations, et qui correspondent au fonctionnement des données AREAS.

Nous avons calculé deux moyennes : la moyenne 1972-2000 (29 ans), et la moyenne 1985-1999 (15 ans), ce qui permet d'intégrer les valeurs de Saint-Laurent en Caux. Elles sont reportées dans le Tableau 8 ci-dessous :

| POSTE                 | 1985-1999   |     |      | 1972-2000  |     |      |
|-----------------------|-------------|-----|------|------------|-----|------|
|                       | Moy.        | Min | Max  | Moy        | Min | Max  |
| Sommèsnil             | <b>987</b>  | 720 | 1297 | <b>980</b> | 682 | 1319 |
| Saint Laurent en Caux | <b>1008</b> | 734 | 1278 | -          | -   | -    |
| Avremesnil            | <b>799</b>  | 604 | 1083 | <b>822</b> | 604 | 1200 |
| Cany-Barville         | <b>982</b>  | 655 | 1422 | <b>968</b> | 635 | 1422 |

Tableau 8 : moyennes annuelles des précipitations (mm)

Sur la période 1985-1999, les moyennes annuelles s'établissent entre 800 mm environ vers Avremesnil, et plus de 1000 mm à Saint Laurent. On note à nouveau un gradient significatif entre les zones sub-côtières (Avremesnil) et l'intérieur (valeurs très proches pour les 3 autres postes).

Sur la période 1972-2000, elles restent très voisines, en très légère diminution à Sommèsnil et Cany-Barville, et en très légère augmentation à Avremesnil. Les valeurs étant proches, on prendra dans la suite comme référence la période 1985-1999, pour intégrer les valeurs de Saint Laurent.

A ce stade, il est utile de comparer les valeurs obtenues sur nos postes de référence avec les données plus classiques et basées sur l'analyse d'un plus grand nombre de postes. Parmi les données actuellement à notre disposition, figurent celles utilisées dans l'atlas érosion (cité dans la partie bibliographique), et qui consiste en une cartographie des moyennes annuelles sur le département, issue de la période 1961-1990 (Figure 10). Un algorithme de spatialisation, appelé Aurelhy, est utilisé à cette fin.

Pour le poste d'Avremesnil, situé à la transition de couleur vert-foncé/bleu-clair, les valeurs sont très proches (799 mm et 801 mm). En revanche, la valeur calculée sur Cany-Barville (982 mm), est supérieure à celle indiquée par la cartographie (la zone de transition bleu clair/bleu foncé, très proche du poste, représente la limite 866 mm). Il est plus difficile de

se prononcer pour Sommesnil et Saint-Laurent situés à l'intérieur de la vaste zone en bleu foncé, dont les valeurs sont comprises entre 866 mm et 1032 mm. Remarquons cependant que la valeur de Saint-Laurent (1008 mm), pourtant éloigné du centre de la zone est déjà très proche de ce maximum.

En conclusion, si la cohérence générale est respectée, en particulier l'augmentation des précipitations de la côte vers l'intérieur, les valeurs moyennes que nous avons calculées avec les données les plus récentes paraissent supérieures dans les régions de l'intérieur.

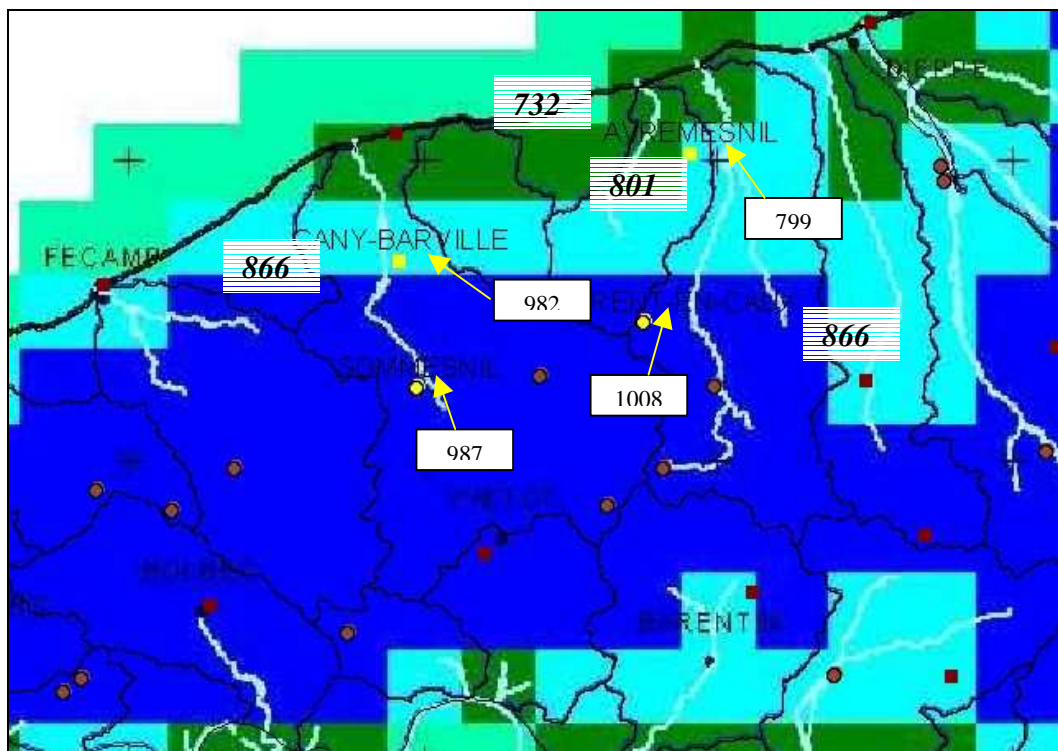


Figure 10 : comparaison entre les moyennes annuelles de précipitations calculées aux postes de références et les moyennes spatialisées (source de ces dernières : Météo-France, présentée dans l'atlas érosion, op. cit.). Les valeurs aux postes sont représentées dans un rectangle, les valeurs associées aux transitions de couleur sont représentées en italique.

La cohérence interne des données des 4 postes de référence a été testée avec la méthode utilisée pour les données AREAS, c'est-à-dire en analysant le nuage de points formé par les cumuls mensuels et la droite de régression associée, sur la période restreinte janvier 1995-décembre 2000.

Ci-dessous est reporté le carré du coefficient de corrélation entre les couples de postes, à la fois AESN et MF.

| X \ Y         | Sommesnil | Saint Laurent | Cany-Barville | Avremesnil |
|---------------|-----------|---------------|---------------|------------|
| Sommesnil     |           |               |               |            |
| Saint Laurent | 0,96      |               |               |            |
| Cany-Barville | 0,95      | 0,96          |               |            |
| Avremesnil    | 0,92      | 0,92          | 0,92          |            |

Tableau 9 : carré du coefficient de corrélation pour chaque couple de poste (MF et AESN confondus)

Là encore, la cohérence est très bonne, notamment entre les postes de l'intérieur, puisqu'elle s'établit à 0,95. On note, de façon tout aussi uniforme, une corrélation plus faible entre les précédents et Avremesnil (0,92). On peut penser à un effet de distance, mais sans doute aussi à la particularité de comportement de la zone sub-littorale.

La pente de la droite de régression  $y = a \cdot x$  est reportée ci-dessous :

| X \ Y         | Sommensnil | Saint Laurent | Cany-Barville | Avremesnil |
|---------------|------------|---------------|---------------|------------|
| Sommensnil    |            |               |               |            |
| Saint Laurent | 0,94       |               |               |            |
| Cany-Barville | 1,00       | 1,05          |               |            |
| Avremesnil    | 1,17       | 1,26          | 1,18          |            |

Tableau 10 : pente de la droite de régression pour chaque couple x/y de postes

La droite s'écarte sensiblement de l'unité pour l'ensemble des postes avec Avremesnil, avec un maximum de 1,26 sur Saint-Laurent. On retrouve ainsi les « classements » observés sur les moyennes annuelles 1985 – 1999 : Avremesnil fournit les valeurs les plus faibles, Saint-Laurent les plus élevées, Cany et Sommensnil étant intermédiaires et très proches l'un de l'autre.

Il est utile pour la suite de l'étude, en particulier pour la comparaison avec les données AREAS, de comparer non seulement le classement mais les valeurs numériques des pentes des régressions avec les moyennes annuelles. Pour cela, on a pris le poste d'Avremesnil comme base de référence, pour normaliser la moyenne :

| Poste                | Pente de la régression (1) | Moyenne normalisée (2) |
|----------------------|----------------------------|------------------------|
| <b>Avremesnil</b>    | (1,00)                     | (1,00)                 |
| <b>Cany-Barville</b> | 1,18                       | 1,22                   |
| <b>Sommensnil</b>    | 1,17                       | 1,23                   |
| <b>Saint-Laurent</b> | 1,26                       | 1,26                   |

Tableau 11 : comparaison entre la pente de la régression et la moyenne normalisée

(1) : valeur des postes en y pour Avremesnil en x

(2) : moyenne du poste / moyenne d'Avremesnil

Il apparaît un bon accord entre ces deux séries de données, à quelques pour cent près. Un léger écart est à attendre dans la mesure où les données d'entrée ne sont pas exactement les mêmes (données annuelles/mensuelles) et les méthodes de calcul diffèrent pour le poids accordé aux diverses données.

#### **4.4. Comparaison entre les postes pluviométriques de l'AREAS et les autres postes**

L'échantillon ainsi constitué par les données AESN et MF d'une part et les données des postes AREAS d'autre part va permettre une comparaison globale. Rappelons que les données MF et AESN seront ici considérées comme référence, vis-à-vis des éventuels problèmes d'étalonnage. Les résultats précédents, montrant une très bonne cohérence globale des postes MF et AESN viennent supporter cette hypothèse.

De plus, la plage de variation des valeurs est voisine dans les deux groupes, et met en évidence des différences assez faibles à l'intérieur de chaque groupe, explicable en partie par la position relative des postes vis-à-vis du gradient côte / intérieur. Enfin, on étudiera bien sûr la période 1995-2000, seule disponible pour les données AREAS, par la méthode des nuages de points, dont on a vu qu'elle donnait d'assez bonnes indications.

Pour toutes ces raisons, on étudiera de préférence des couples de postes possédant une bonne proximité géographique.

Le premier d'entre eux est le couple le Hanouard / Sommensnil, distants seulement de quelques kilomètres. On commence par l'analyse graphique simple par histogramme (Figure 11).

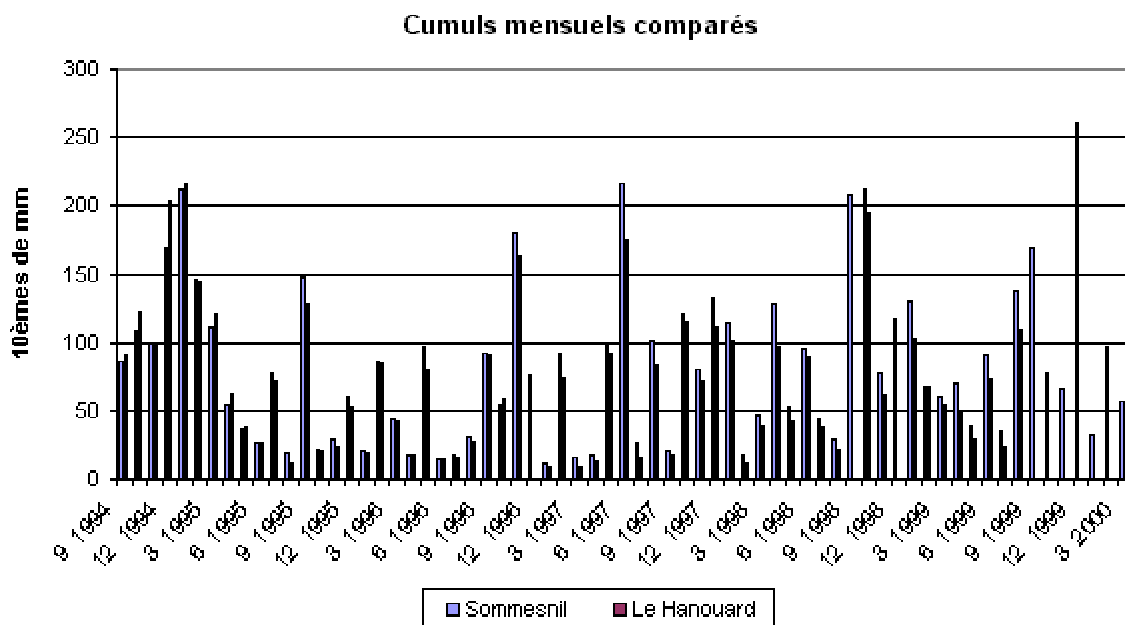


Figure 11 : cumuls mensuels comparés des postes du Hanouard (AREAS) et de Sommesnil (AESN)

On remarque qu'au début de la période (qui débute à l'automne 1994), les valeurs observées au Hanouard sont pratiquement toujours supérieures, puis après 1996 elles deviennent inférieures, notamment à l'automne 1999. Ce comportement est suspect, et semble mettre en évidence une modification des valeurs du Hanouard vers la fin 1995. On n'a pas toutefois relevé d'événement particulier sur la vie du poste venant expliquer ce comportement.

Sur la totalité de l'échantillon, la régression s'établit comme suit :

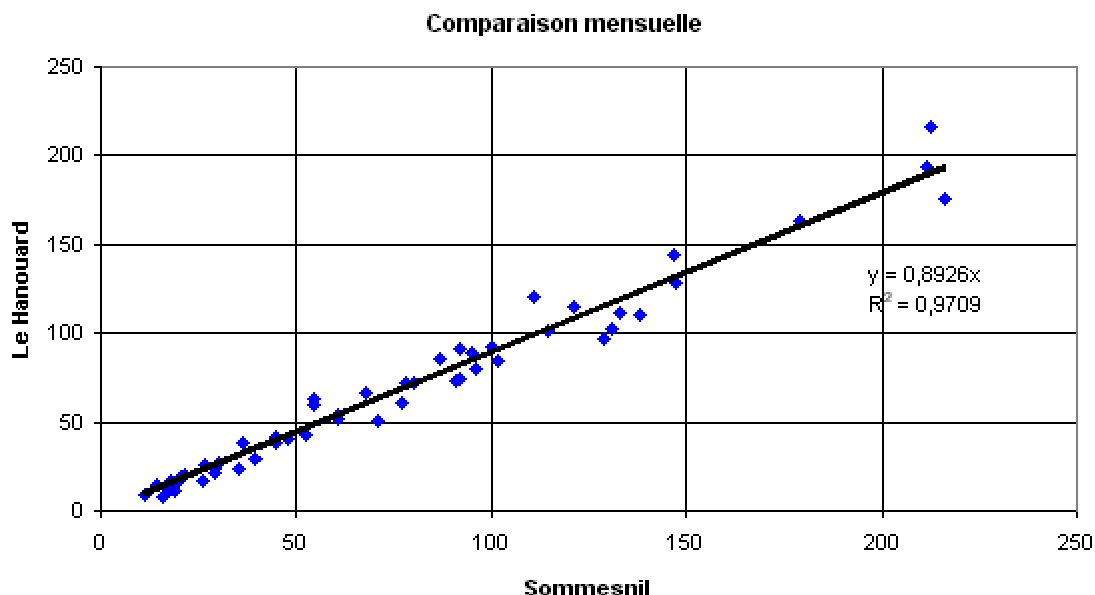


Figure 12: cumuls mensuels des postes du Hanouard (AREAS) et de Sommesnil (AESN) et droite d'ajustement

Sur l'ensemble de l'échantillon, la corrélation reste excellente (carré de 0,97), mais les valeurs sont inférieures d'environ 10% sur le Hanouard. La proximité géographique entre les deux postes rend cette différence suspecte elle aussi, ce qui est en cohérence avec la remarque précédente. On semble donc s'orienter vers la conclusion d'une sous-estimation systématique des pluies sur le Hanouard d'environ 10% depuis 1995/1996 environ.

Pour les 3 autres postes de l'AREAS, il n'existe pas de poste « de référence » aussi proche. Notons par exemple :

- pour Bourg-Dun, situé très près du littoral, le poste le plus proche en distance et à la situation comparable est Avremesnil ;
- pour Blosseville, on effectuera aussi des comparaisons avec Avremesnil ;
- pour Bourville, on prendra Saint-Laurent, même si l'on sait a priori que ce dernier est situé plus à l'intérieur et Cany-Barville, plus éloigné mais à une distance comparable du littoral.

Sur l'ensemble des comparaisons effectuées, on n'a pas retrouvé de phénomène de dérive comparable à ce qui était observé pour le Hanouard : la « fidélité » de la mesure pour ces postes ne semble donc pas poser de problème.

En ce qui concerne les paramètres de la régression, ceux-ci sont reportés au tableau suivant :

| <b>Poste AREAS</b> | <b>Poste de référence</b> | <b>R<sup>2</sup></b> | <b>Pente</b> |
|--------------------|---------------------------|----------------------|--------------|
| Bourg-Dun          | Avremesnil                | 0,93                 | 1,08         |
| Blosseville        | Avremesnil                | 0,92                 | 1,02         |
| Bourville          | Cany-Barville             | 0,96                 | 1,12         |
| Bourville          | Saint-Laurent             | 0,97                 | 1,20         |

*Tableau 12 : paramètres de l'équation de régression entre les poste AREAS et les postes de référence*

La corrélation reste satisfaisante, même si elle est légèrement plus faible dans 2 cas sur 3 avec Avremesnil (dans ce cas, cela nous conduirait à suspecter davantage le poste d'Avremesnil, puisque le même fait s'était produit pour les postes AESN et MF ; néanmoins cette baisse reste faible).

La pente de la régression fournit les éléments suivants<sup>2</sup> :

- Bourg-Dun présente des valeurs plus faibles qu'Avremesnil, ce qui est compatible avec une position plus proche du littoral, même si la différence (8 %) est assez importante ;
- Blosseville a des valeurs très proches d'Avremesnil (différence de 2 %) ;
- Bourville présente des valeurs inférieures à Cany (10 %) et surtout Saint Laurent (20 %), situés toutefois plus à l'intérieur.

Afin de mieux appréhender la répartition spatiale de ces différences, la figure ci-dessous présente comme au tableau 12 la pente de la droite de régression obtenue entre les postes de l'AREAS et le poste d'Avremesnil.

<sup>2</sup> Notons toutefois que ces éléments nécessitent un degré de précaution supplémentaire quant à des comparaisons globales, dans la mesure où les chroniques des postes AREAS ne sont pas continues, et que les absences de données ne se situent pas forcément aux mêmes périodes.

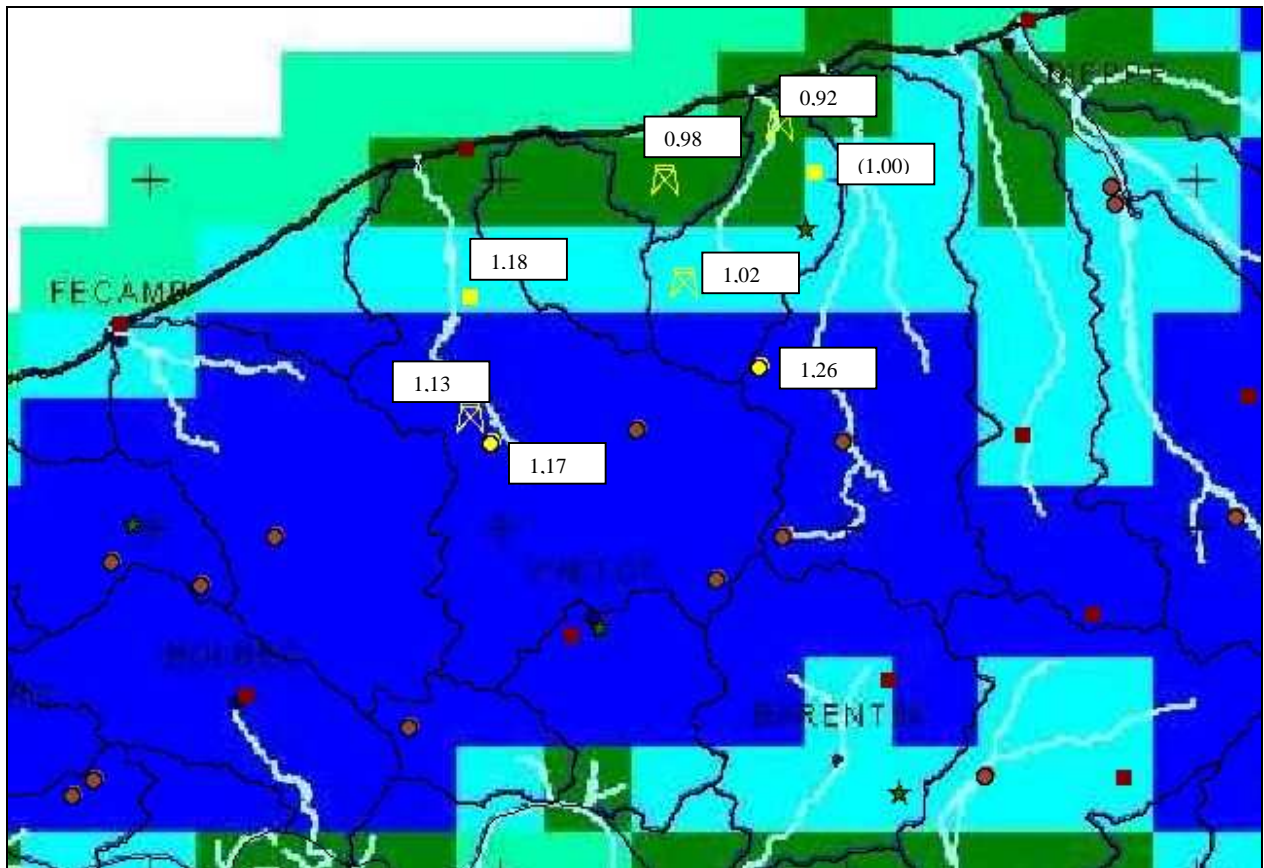


Figure 13 : pente de la droite de régression obtenue entre chaque poste et Avremesnil, en superposition des cumuls pluviométriques cartographiés (voir Figure 10).

Avec toute la prudence nécessaire quant à l'interprétation de telles données, il apparaît ici que les données des postes AREAS s'insèrent relativement bien dans le schéma d'ensemble. Les valeurs plus faibles observées à Avremesnil sont cohérentes avec sa position sub-littorale. Il en est de même à Blossesville, situé légèrement plus à l'intérieur. Les valeurs de Bourville pourraient paraître un peu faibles, notamment vis-à-vis de Cany-Barville. Néanmoins, ce dernier poste pourrait tout aussi bien présenter une certaine surestimation. Seul le Hanouard semble un peu sous-estimé, comme l'analyse précédente l'a montré.

Il nous semble donc possible d'utiliser directement les valeurs de 3 postes de l'AREAS (Blossesville, Bourg-Dun et Bourville) pour le calcul des cumuls quotidiens de pluie qui sera nécessaire dans la suite de l'étude. En ce qui concerne Le Hanouard, il pourrait en revanche être judicieux d'appliquer un facteur correctif compris entre 5 % et 10 % à partir de 1996. Nous ne l'avons pas fait, nous contentant de conserver un regard critique sur les valeurs pluviométriques de ce poste.

## 4.5. Données de ruissellement de l'AREAS

### 4.5.1. Validation des données

Dans un souci de validation et de cohérence, les chroniques limnimétriques des stations de mesures de l'AREAS ont toutes été établies à partir des enregistrements bruts disponibles, en procédant à la validation et à la mise en forme de ces données.

Alors qu'un enregistrement pluviométrique (un hyétogramme) peut prendre des valeurs très diverses dans ses intensités et leurs successions, un limnigramme n'est jamais très différent d'un autre limnigramme. Le signal est donc beaucoup plus simple à interpréter, et les enregistrements douteux, sont beaucoup plus faciles à identifier.

La principale difficulté a été ici d'ordre métrologique : corriger les dérives des sondes enregistrant les hauteurs d'eau.

L'AREAS dispose des données limnimétriques sur quatre sites. Le tableau ci-dessous les rappelle en précisant les périodes de fonctionnement.

| <b>Nom du site</b>          | <b>Surface drainée (ha)</b> | <b>Début d'exploitation de la limnimétrie</b> |
|-----------------------------|-----------------------------|---|
| Blosseville – seuil jaugeur | 90                          | avril 1988                                    |
| le Hanouard                 | 270                         | août 1994                                     |
| Bourville                   | 1100                        | janvier 1995                                  |
| le Bourg Dun                | 10700                       | janvier 1995                                  |

*Tableau 13 : périodes d'exploitation de la limnimétrie sur les sites de l'AREAS*

Aucun de ces sites n'est arrêté. Il est à noter que les données comprises entre 1988 et mars 1992 pour le site *Blosseville – seuil jaugeur* ne sont plus disponibles que sous format papier, et que la pluviométrie de ce site n'est validée qu'à partir de 1995.

Rappelons que le site du Bourg Dun est un peu différent des trois autres : il est implanté sur une rivière, et non en vallée sèche. De plus, depuis le début de l'année 2000, son entretien et son exploitation sont assurés intégralement par la DIREN Haute-Normandie. De ce fait, l'exploitation de sa limnimétrie dans le cadre de cette étude a été celle réservée aux informations hydrologiques issues de ce service.

Pour le stockage et l'exploitation des données limnimétriques, nous avons utilisé les outils informatiques de la DIREN. Il s'agit en particulier du logiciel DP+ version 5.0. Destiné au stockage de hauteurs d'eau, il autorise le calcul des débits en renseignant une courbe de tarage pour la station considérée. Il permet de plus de gérer l'import et l'export de données au format HYDRO, la banque de données hydrologiques nationale.

La Figure 14 ci-dessous présente les périodes pour lesquelles la limnimétrie est disponible sur chaque site. Les périodes pour lesquelles les enregistrements n'ont pu être validés sont parfois importantes. C'est particulièrement vrai pour les stations de Blosseville et du Hanouard, les sites drainant les surfaces les plus petites. Ceci est dû en partie au fait que les installations matérielles, de plus petites dimensions, sont plus sensibles aux risques de pannes.

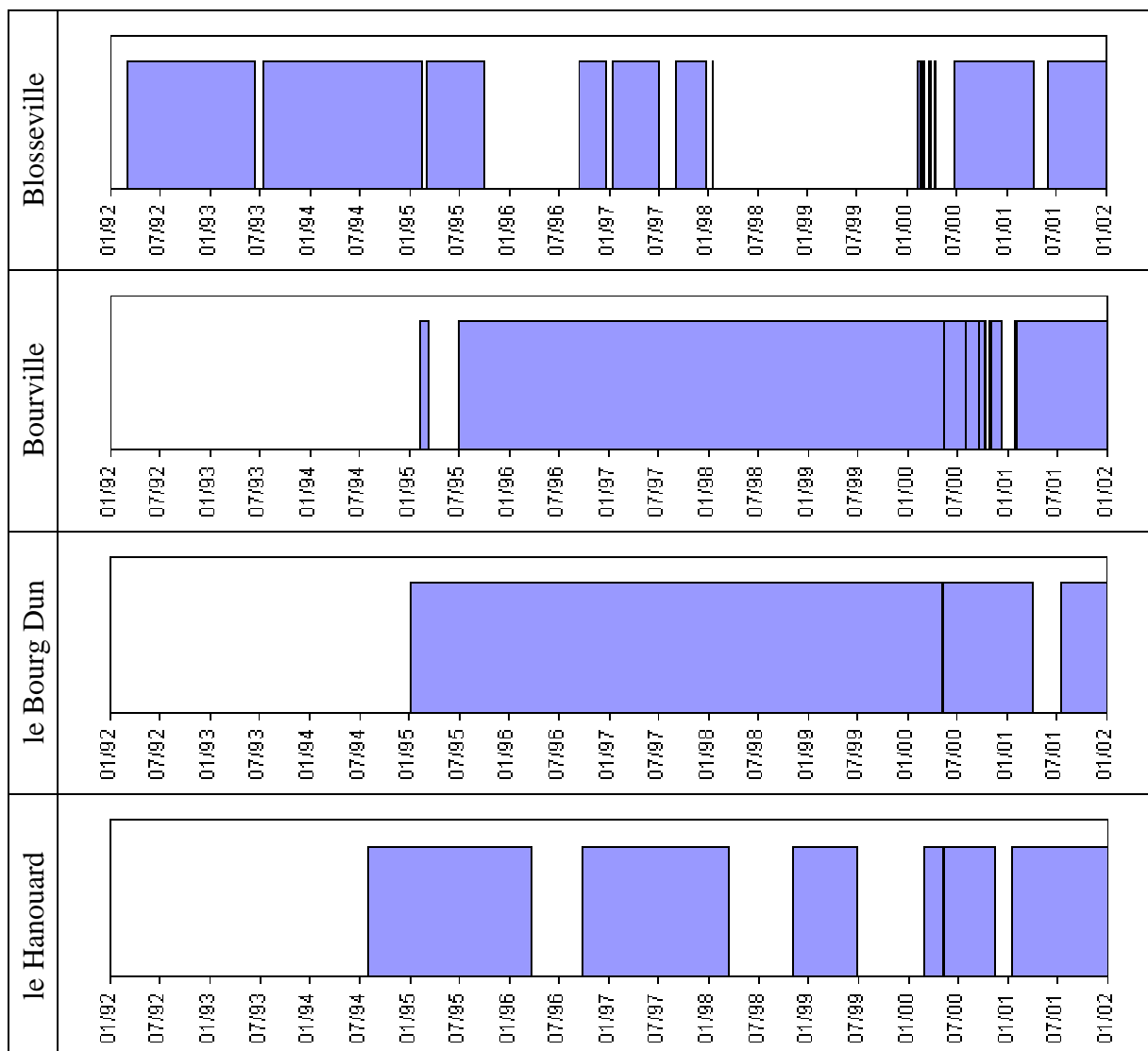


Figure 14 : périodes de données limnimétriques validées pour les sites de l'AREAS

#### 4.5.2. Exploitation des données

Pour identifier les désordres hydrologiques majeurs enregistrés sur les sites suivis par l'AREAS, nous avons testé les deux critères principaux pour décrire un ruissellement : la lame ruisselée et le débit de pointe, définis ci-dessous, pour finalement n'en retenir qu'un.

##### Lame ruisselée

Pour pouvoir comparer les volumes ruisselés par des bassins versants de surfaces différentes, nous avons considéré la *lame ruisselée (LR)*, c'est-à-dire le volume total écoulé au cours d'un événement ruisselant ( $V_t$ ) ramené à la surface du bassin versant ( $S$ ), exprimé en *mm*, équivalent à des  $L.m^{-2}$ .

$$LR = \frac{V_t}{S} \cdot 10^{-3} \quad \text{où LR est en mm, } V_t \text{ en m}^3 \text{ et S en km}^2$$

Pour comparer des ruissellements mesurés sur différents bassins versants, il faut tenir compte d'un autre biais : à surface égale, l'occupation du sol influence sur la quantité d'eau qui ruisselle. En effet, toutes choses égales par ailleurs, un bassin versant présentant une forte

proportion en prairies et en bois produira un ruissellement plus faible que s'il n'est composé que de terres labourées et de surfaces construites.

Pour tenir compte de cela, nous avons soustrait à la surface totale du bassin versant les surfaces qui sont reconnues pour ne pas générer de ruissellement pour des pluies hivernales de faible intensité sur des sols limoneux épais : les prairies et les bois. Nous avons ainsi défini en première approximation la *surface potentiellement ruisselante*  $S_{pr}$  comme

$$S_{pr} = S - S_{prairies} - S_{bois}$$

D'où la définition de la *lame ruisselée par les surfaces potentiellement ruisselantes* ( $LR_{pr}$ ) :

$$LR_{pr} = \frac{V_t}{S_{pr}} \cdot 10^{-3} \quad \text{où } LR_{pr} \text{ est en mm, } V_t \text{ en m}^3 \text{ et } S_{pr} \text{ en km}^2$$

Désormais, toutes les lames ruisselées évoquées devront être comprises comme des *lames ruisselées par les surfaces potentiellement ruisselantes* ainsi définies.

### Débit de pointe

Une autre grandeur caractéristique d'un événement ruisselant est son débit de pointe ( $Q_p$ ). Il s'agit du débit instantané le plus élevé enregistré au cours d'un ruissellement. Indépendamment de la lame ruisselée, un débit de pointe fort est générateur de désordres hydrologiques.

Pour pouvoir comparer les débits de pointes de différents bassins versants, comme pour le volume, cette grandeur doit être ramenée à la surface du bassin versant ( $S$ ), ou à sa surface potentiellement ruisselante ( $S_{pr}$ ).

Cependant, le débit de pointe n'est pas directement proportionnel à la surface du bassin versant. Cela est abondamment décrit dans la bibliographie, dans les grands bassins versants (plus de 100 km<sup>2</sup>), le ruissellement sera plus étalé dans le temps (temps de réponse important). Le débit de pointe spécifique sera ainsi plus faible que sur un bassin versant plus petit. Pour tenir compte de ce problème d'échelle, on fait généralement intervenir une puissance inférieure à 1 sur  $S$ . Nous nous proposons d'utiliser les résultats obtenus par le CEMAGREF pour élaborer la méthode Crupedix, où la puissance utilisée est 0,8. On définit ainsi le débit de pointe spécifique comme :

$$Q_{ps} = \frac{Q_p}{S_{pr}^{0,8}}$$

### Ruissellement élémentaire

Sur nos bassins versants expérimentaux, nous avons cherché à décrire les événements ruisselants unitaires. Pour cela, il est nécessaire d'en définir les limites. Dans les vallées sèches que nous avons équipées, l'état normal est l'absence de ruissellement. Les limites d'un événement ruisselant sont de prime abord simplement déterminées par l'absence ou la présence d'un écoulement.

Au sein d'un événement ruisselant ainsi défini, il est possible d'associer des ruissellements qu'on serait tenté de décrire comme distincts parce que engendrés par des événements pluvieux manifestement distincts. La figure suivante, cas réel enregistré au site de Bourville en janvier 1998, illustre ce cas : bien qu'appartenant au même épisode ruisselant qui se déroule du 4 janvier après-midi au 6 janvier après-midi, la crue de la nuit du 4 au 5 janvier, et celle de la nuit du 5 au 6 janvier sont le fait de pluies bien distinctes.

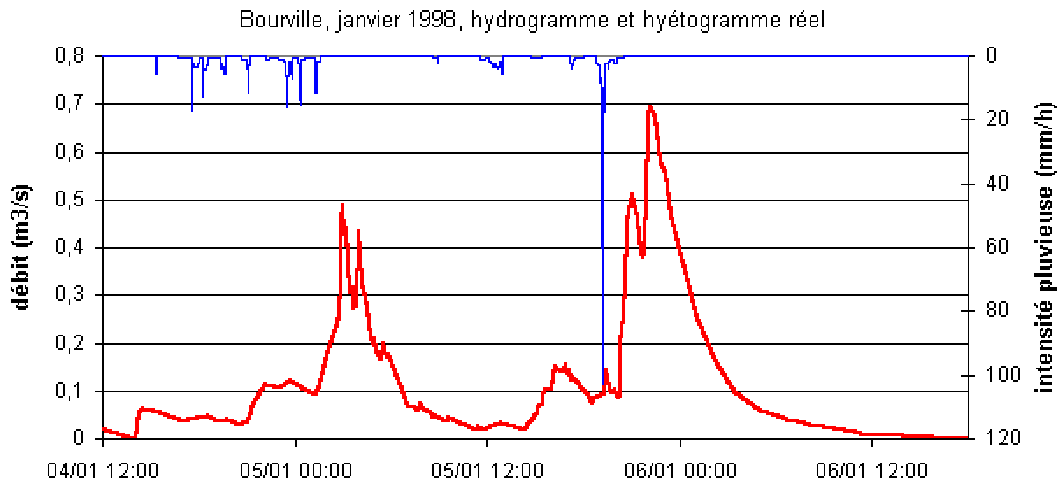


Figure 15 : hydrogramme et hyétoگرامme brut, Bourville, du 4 au 6 janvier 1998

Nous avons donc cherché à définir précisément quels épisodes pluvieux engendraient quels ruissellements, ce qui revient à découper l'hydrogramme global en différentes unités, appelées *ruissellements élémentaires*.

Le cœur d'un ruissellement élémentaire, élément graphique facile à identifier, sera un débit de pointe. Reste à définir les bornes.

Compte-tenu de la taille et de la forme simple de nos bassins versants expérimentaux, nous savons que les réponses hydrauliques sont de forme unitaire. Nous avons donc repris la courbe théorique de l'hydrogramme unitaire, tel que définie par le *Soil Conservation Service*.

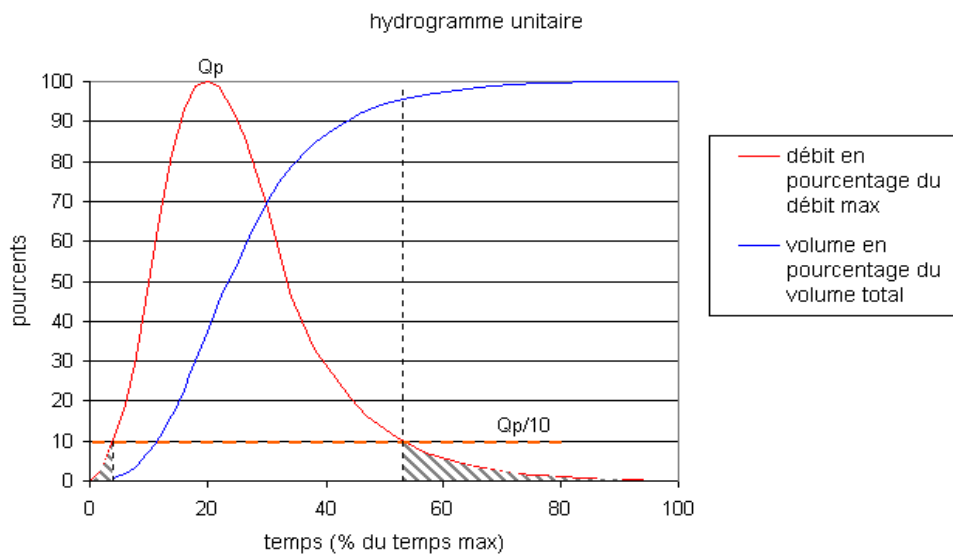


Figure 16 : hydrogramme unitaire du SCS (SCHWAB et al., 1993, pp 85-87)

L'analyse de ce graphique montre que le volume écoulé lorsque le débit instantané  $Q_i$  est inférieur à  $Q_p/10$  est inférieur à 6 % du volume total. Aussi en ne considérant que la période où  $Q_i$  est supérieur à  $Q_p/10$ , on fait une erreur sur le volume total écoulé de l'ordre de 6 % au maximum, ce qui est une erreur tolérable.

Nous avons donc retenu la définition suivante : *deux pointes d'un hydrogramme appartiennent au même ruissellement élémentaire si le débit minimal intermédiaire entre ces deux pointes est supérieur au dixième du débit de la plus forte de ces deux pointes ; dans le*

cas contraire, ce débit minimal intermédiaire sert de limite à deux ruissellements élémentaires, considérés comme distincts.

Imposer une limite artificielle entre deux pointes de ruissellement va rattacher le début du second ruissellement au premier, et la fin du premier au second. En appliquant cette définition, on espère donc faire une erreur *inférieure* à 10 % sur le volume total des ruissellements élémentaires, ce qui est une erreur raisonnable en hydrologie. Pour illustration, l'hydrogramme de janvier 1998 à Bourville a été découpé en ruissellements élémentaires sur la Figure 17 ci-dessous.

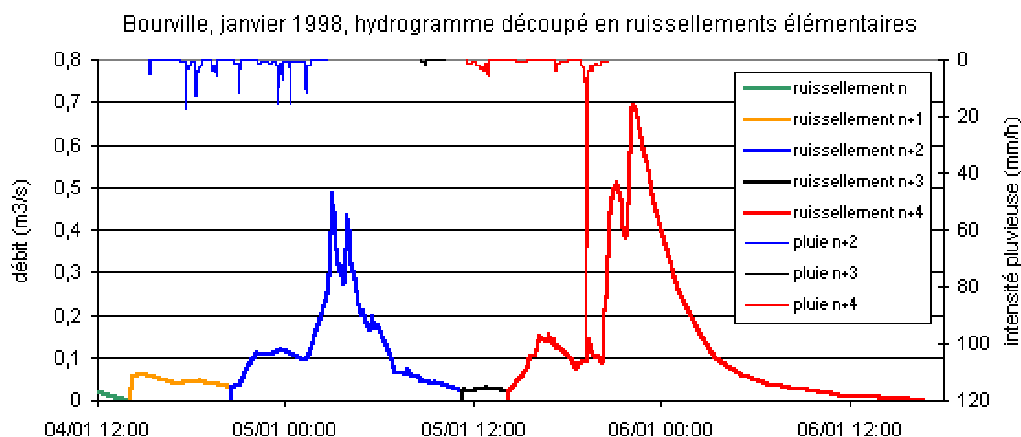


Figure 17 : hydrogramme découpé en ruissellements élémentaires, Bourville, du 4 au 6 janvier 1998

Après avoir défini un ruissellement élémentaire et ses limites, il nous faut connaître la pluie qui l'a généré. Nous n'avons trouvé aucune heuristique pour définir automatiquement la pluie génératrice d'un ruissellement. Ce travail a donc été fait au cas par cas pour chacun des événements ruisselants auxquels nous nous sommes intéressés, et non pas pour la totalité des événements. Sur l'ensemble de nos trois sites de mesures en vallée sèche, il existe une bonne relation entre lame ruisselée et débit de pointe spécifique, comme l'illustre la Figure 18 ci-dessous.

Les travaux de recherche récents, notamment ceux de l'INRA, ont établi un lien entre l'état de surface des sols et les lames ruisselées qu'il génère. Nous avons donc retenu d'utiliser la lame ruisselée par les surfaces potentiellement ruisselantes comme unique descripteur d'un ruissellement.

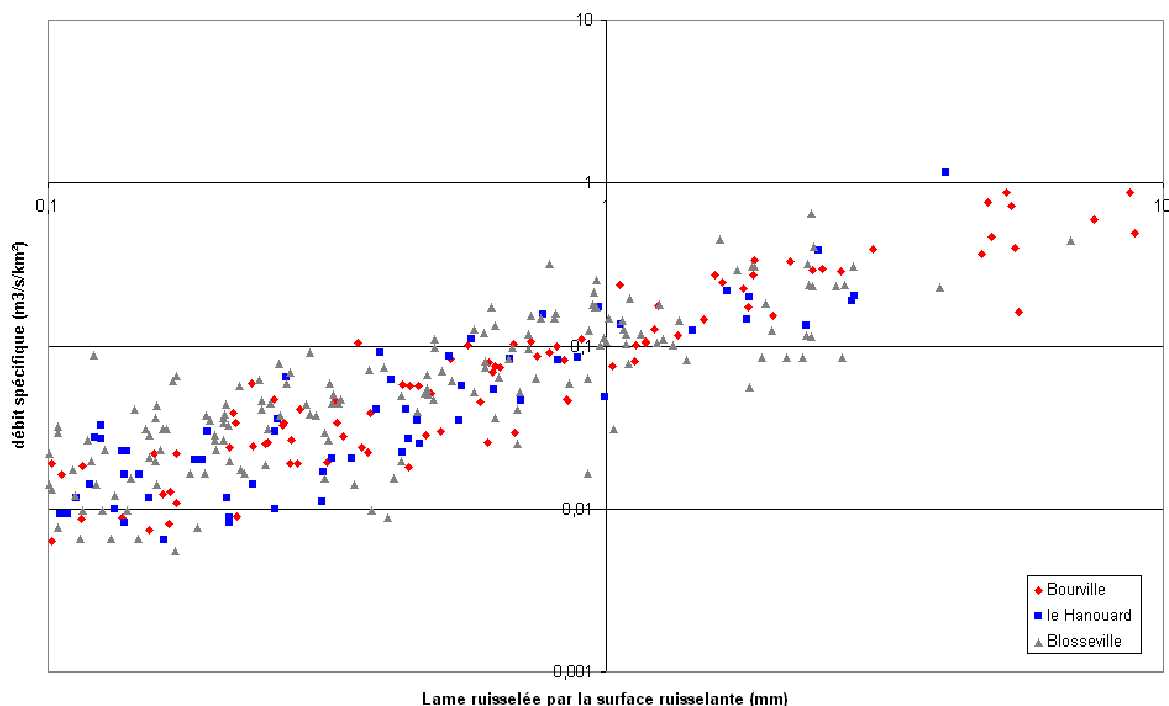


Figure 18 : débit de pointe spécifique et lame ruisselée des écoulements en vallée sèche (sites équipés par l'AREAS)

Pour être sûr de n'omettre aucun désordre hydrologique majeur survenu sur nos sites de mesures, nous avons défini un seuil assez bas de lame ruisselée. Ainsi nous avons retenu tous les ruissellements élémentaires dont la lame ruisselée est supérieure ou égale à 1 mm. Pour chacun d'eux, la pluie génératrice a été recherchée. Lorsque la pluie du site n'était pas disponible, nous avons cherché à la reconstituer. Pour ce faire, nous avons simplement utilisé la chronique pluviométrique d'un site voisin.

Étant donné le seuil choisi, on peut définir les événements recensés comme l'ensemble des ruissellements importants survenus sur nos sites de mesures. Le Tableau 14 détaille cette population de ruissellements.

| site         | nombre de ruissellements élémentaires dont $LR \geq 3$ mm | nombre de ruissellements élémentaires dont $LR \geq 1$ mm | nombre d'événements dont $LR \geq 1$ mm et |                           |                       |
|--------------|---|---|--|---------------------------|-----------------------|
|              |   |   | la pluie est connue                        | la pluie est reconstituée | la pluie est inconnue |
| Blosseville  | 2   | 24  | 12   | 0                         | 11                    |
| Bourville    | 8   | 22  | 14   | 8                         | 0                     |
| le Hanouard  | 1   | 11  | 6  | 1                         | 4                     |
| <b>TOTAL</b> | <b>11</b>   | <b>57</b>   | <b>32</b>                                  | <b>9</b>                  | <b>15</b>             |

Tableau 14 : recensement des événements ruisselants antérieurs au 01/01/2001 de lame ruisselée  $\geq 1$  mm

#### 4.6. Données Cat. Nat.

Les données ont été recherchées sur la base de données CORINTE mise à la disposition du public par le Ministère de l'Environnement.

Comme décrit précédemment, l'entité géographique de base est la commune, et chaque dossier est caractérisé par sa date et une indication sur la nature de l'agent naturel responsable.

C'est pourquoi nous avons tout d'abord procédé à une sélection sur les points suivants :

- sur la commune, qui doit appartenir à la zone d'étude que nous avons définie ;
- sur la date du dossier, puisqu'ont été exclues *a priori* les dates comprises entre le 1<sup>er</sup> mai et le 30 septembre ;
- sur la nature du phénomène : pour cela, on n'a retenu que les dossiers labellisés « inondations et coulées de boue ».

Suite à ce premier tri, un second tri a été effectué sur les dates. En effet, il est apparu que dans certains cas, les dates de début d'événement étaient les mêmes, alors que les dates de fin pouvaient différer. Nous avons généralement considéré qu'il s'agissait des mêmes événements, et procédé à des regroupements au cas par cas.

Le résultat final est représenté sur le tableau ci-dessous :

| <b>Date début</b> | <b>Date fin</b> | <b>Nb communes</b> | <b>groupe</b> |
|-------------------|-----------------|--------------------|---------------|
| 23/01/84          | 24/01/84        | 3                  | g1            |
| 22/01/88          | 22/01/88        | 2                  | g1            |
| 31/01/88          | 01/02/88        | 1                  | g1            |
| 11/02/88          | 13/02/88        | 1                  | g1            |
| 15/02/88          | 21/02/88        | 1                  | g1            |
| 04/11/89          | 05/11/89        | 1                  | g1            |
| 13/02/90          | 16/02/90        | 3                  | g1            |
| 02/12/92          | 07/12/92        | 54                 | g2            |
| 11/10/93          | 14/10/93        | 14                 | g2            |
| 15/12/93          | 16/12/93        | 1                  | g1            |
| 20/12/93          | 24/12/93        | 123                | g2            |
| 27/12/93          | 30/12/93        | 1                  | g1            |
| 30/12/93          | 31/12/93        | 1                  | g1            |
| 24/10/94          | 24/10/94        | 5                  | g1            |
| 29/12/94          | 30/12/94        | 4                  | g1            |
| 17/01/95          | 05/02/95        | 228                | g2            |
| 01/03/95          | 05/03/95        | 2                  | g1            |
| 28/10/96          | 29/10/96        | 1                  | g1            |
| 03/01/99          | 03/01/99        | 1                  | g1            |
| 03/10/99          | 03/10/99        | 4                  | g1            |
| 24/12/99          | 24/12/99        | 121                | g2            |
| 25/12/99          | 29/12/99        | 468                | g2            |
| 20/03/01          | 22/03/01        | 5                  | g1            |
| 21/03/01          | 21/03/01        | 3                  | g1            |

Tableau 15 : tableau des événements CatNat

On obtient ainsi un total de 24 événements sur la période 1982-2001. Le nombre de communes concernées est fort variable, puisqu'on note à 9 reprises que les dates ne concernent qu'une seule commune, alors que le 25/12/99 toutes les communes de la zone (et d'ailleurs du département) sont classées, soit un nombre de 468.

On voit donc deux grands groupes se dessiner, un premier groupe comprenant des événements sur peu de communes (1 à 5), donc plutôt locaux, et un second groupe d'événements beaucoup plus étendus. C'est ce qui est noté dans la colonne « groupe » du Tableau 15 : le premier groupe est noté g1 et le second g2. A titre d'exemple, est fournie en

annexe une représentation cartographique d'un événement du premier groupe et d'un événement du 2<sup>ème</sup> groupe.

La deuxième constatation est que la durée pour un événement est parfois très large, allant jusqu'à plus de 20 jours comme en janvier 1995. C'est là une différence importante avec les épisodes d'été, causés par les orages, où la durée limitée du phénomène laisse peu de place à l'ambiguïté sur les dates.

Le nombre d'événements par an est assez variable (Figure 19). Ainsi, on note une quasi-absence avant 1988, une densité plus importante entre 1988 et 1996, une certaine baisse ensuite. Il est cependant délicat d'en déduire des indications nettes quant à la survenue effective des problèmes d'inondation :

- il n'est pas certain que pendant la période initiale l'ensemble des communes ait eu connaissance des possibilités offertes par le système d'indemnisation ;
- par la suite, il n'est pas non plus certain que les critères d'acceptation soient restés identiques lorsque les demandes sont apparues plus fréquentes.

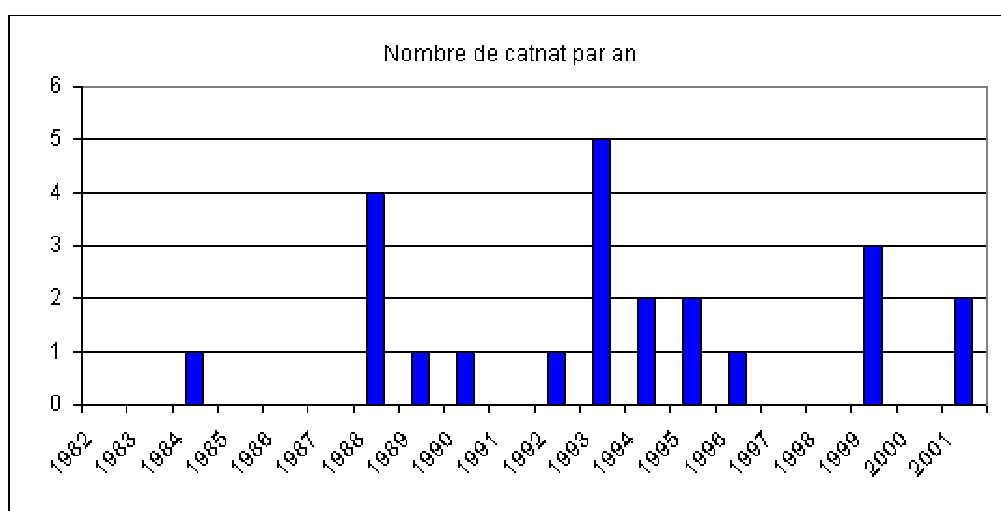


Figure 19 : Evolution du nombre de périodes CatNat « inondations et coulées boueuses » par an de 1982 à 2001 sur la zone d'étude

Ces limites n'affectent pas a priori la répartition saisonnière représentée ci-dessous :

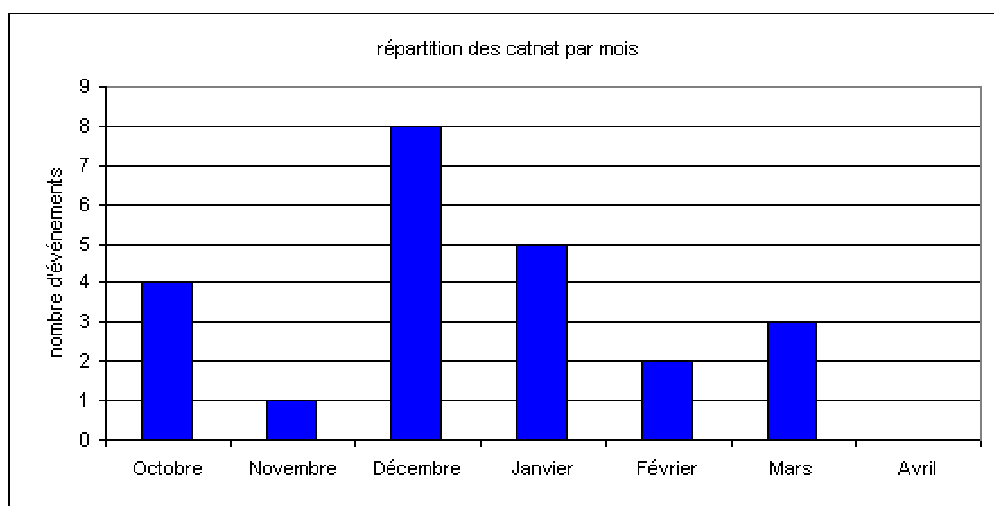


Figure 20 : évolution saisonnière du nombre d'événements CatNat

On remarque que la majorité des événements est groupée autour de décembre et janvier. On notera également qu'octobre est mieux représenté que novembre, qui représente un minimum relatif.

## La question des dates

Il reste que ces durées importantes sont difficiles à justifier par la durée des dégâts occasionnés, et bien entendu sans commune mesure avec la durée des périodes pluvieuses correspondant à des événements. Dans certains cas, comme nous le verrons ultérieurement, il s'agit de périodes pendant lesquelles des inondations successives ont marqué la région. Toutefois, on voit poindre la difficulté potentielle de croiser ces données avec les périodes de pluie correspondantes.

Pour illustrer notre propos, prenons l'exemple de la période du 17 au 31 janvier 1995 (15 jours) et qui a concerné plus de 200 communes au total. Comme on l'a souligné, la persistance de dégâts sur ces communes pendant 14 jours paraît improbable.

Néanmoins, si la date de fin est sujette à caution, on peut faire l'hypothèse que la date de début permet de faire une comparaison avec les données pluviométriques : la pluie génératrice des crues est antérieure ou concomitante avec les dates reportées. Nous avons donc analysé le contenu des pluies pendant la période précédent et suivant cette date. Montrons à titre d'exemple la pluie recueillie à Goderville, qui présente le maximum des postes à notre disposition (Figure 21) :

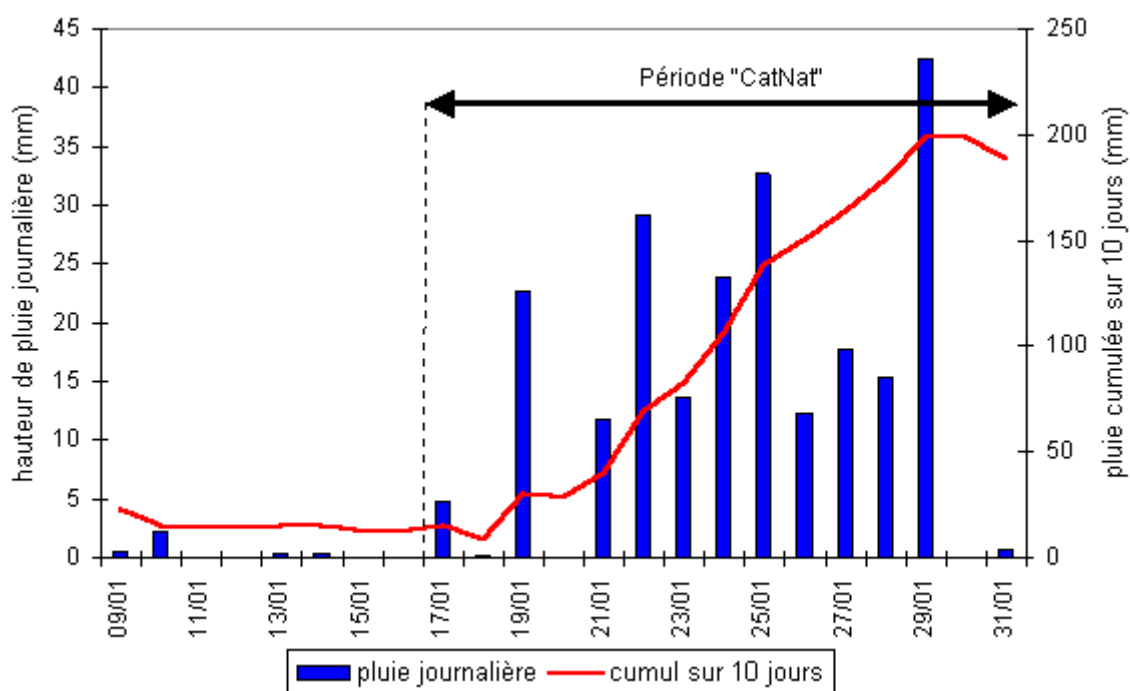


Figure 21 : Evénements de janvier 1995, comparaison entre période CatNat et données pluviométriques de Goderville (la pluie quotidienne est en bleu, le cumul décadaire en rouge).

Cette figure est éloquente : jusqu'au 17 janvier, les pluies restent très faibles : le cumul sur 10 jours est inférieur à 20 mm, et la pluie du jour ne dépasse pas quelques mm. Ce n'est que le 19 janvier qu'on observe une pluie dépassant 20 mm. A partir du 21, les pluies dépassent quasi-quotidiennement les 10 mm, et le paroxysme est atteint le 29 janvier, avec une pluie du jour de 42 mm et un cumul décadaire de plus de 200 mm.

Incontestablement, la période véritablement pluvieuse qui a provoqué les inondations se situe à partir du 22 janvier, et tout porte à croire à ce stade de l'analyse que les désordres se sont succédés pendant une dizaine de jours. La date reportée sur ce dossier ne correspond donc pas au début du phénomène.

Nous avons ensuite tenté de voir si ce fait pouvait se reproduire sur d'autres séquences. En particulier, nous avons sollicité auprès de la Préfecture de la Seine-Maritime

l'accès aux dossiers eux-mêmes, afin de vérifier les dates précises des dommages par commune lorsque cette mention était présente. Nous avons eu la confirmation que les dates reportées correspondaient souvent à une « enveloppe » très large. Ceci était notamment le cas sur l'ensemble des périodes assez longues et des événements spatialement étendus.

Dès lors qu'une incertitude assez forte (parfois nettement supérieure à la journée comme dans l'exemple ci-dessus) sur la date des événements est avérée, la comparaison avec les données pluviométriques devient extrêmement délicate : rappelons qu'on cherche à vérifier des conditions sur des cumuls de pluie pour des déclenchements d'inondations, requérant une précision de datation de l'ordre de la journée.

**Dans ces conditions, il nous a fallu songer à réorienter la méthodologie de l'étude : l'utilisation directe des dossiers CatNat s'avérant insuffisante, cela nous a contraint à rechercher d'autres sources d'informations concernant les événements hydrologiques.**

#### **4.7. Coupures de presse**

Nous avons alors pensé à utiliser les informations parues dans la presse locale ou régionale, ce qui avait d'ailleurs été le choix effectué par l'INRA dans son étude. Dans un premier temps, nous pensions utiliser ces informations en complément des précédentes, pour préciser les dates d'inondations pour les événements classés au titre des Catastrophes Naturelles.

Une étude *in extenso* de toute la presse locale, quotidienne et hebdomadaire sur l'ensemble de la période d'étude, au travers des archives départementales, par exemple, n'était pas envisageable. Mais nous disposions de quelques journaux achetés lors des crises et archivés à l'AREAS, ainsi que de la revue de presse (exhaustive) réalisée par le CAUE portant sur les inondations en Seine-Maritime sur la période 26/01/1995 – 14/03/1995.

*Paris-Normandie* nous a également transmis un « dossier thématique » sur le thème des inondations en Seine-Maritime. Il est constitué des coupures de presses portant sur ce thème sur la période janvier 1992 – juillet 2001. Il est important de noter que cet ensemble de coupures de presse n'est pas exhaustif mais est issu d'une sélection des articles de chaque numéro jugés les plus intéressants par la rédaction du quotidien.

Bien entendu, les informations recueillies n'ont pas au départ la même homogénéité de contenu que les données CatNat. En contrepartie, l'information est parfois nettement plus riche, puisque contenant des éléments permettant de caractériser la nature même de l'inondation, sa date et sa localisation. Un exemple de coupure de presse est d'ailleurs donné en annexe.

Ainsi, plusieurs éléments sur l'intensité locale du phénomène sont souvent mentionnés : routes coupées, caves inondées, pièces à vivre (ou atelier, usine) inondées, ouvrages d'art submergés ou emportés, coulées de boue généralisées, etc... Dans certains cas, l'origine physique du phénomène (débordement de cours d'eau ou ruissellement) local est explicitement décrite ou peut être déduite des informations recueillies.

La localisation spatio-temporelle est en général assez précise, puisqu'on dispose pratiquement toujours du nom de la commune concernée, et d'une datation de la journée, voire de la phase de la journée (matin, après-midi, soir, nuit), quelquefois de l'heure. Elle ne l'est pourtant pas toujours : les articles les plus courts ne font que mentionner les casernes de pompiers qui ont été mises à contribution. Nous avons renoncé à ces informations dont la précision géographique n'était que cantonale.

Cet ensemble d'éléments a néanmoins l'inconvénient d'être fort dispersé, et nécessite un important travail de synthèse. **C'est pourquoi nous avons choisi de saisir informatiquement l'ensemble des informations disponibles**, et d'en constituer une base de données, sous le logiciel Access. **A notre connaissance, une base de données de ce type sur les événements récents est une première dans le département.**

L'un des avantages de cette méthode est notamment de pouvoir regrouper les événements selon leur date. Le tableau ci-dessous est un exemple de sortie obtenue par ce moyen.

| Date       | Nombre de communes recensées | Types de dégâts               |                         |                         |
|------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 02/12/1992 | 1                            | route coupée                  |                         |                         |
| 06/12/1992 | 23                           | pièces à vivre inondées       | caves inondées          | route coupée            |
| 13/10/1993 | 11                           | route coupée                  | caves inondées          | pièces à vivre inondées |
| 13/12/1993 | 1                            | route coupée                  | caves inondées          |                         |
| 18/12/1993 | 1                            | route coupée                  |                         |                         |
| 20/12/1993 | 42                           | pièces à vivre inondées       | caves inondées          | pièces à vivre inondées |
| 28/12/1993 | 1                            | route coupée                  | pièces à vivre inondées | caves inondées          |
| 01/01/1994 | 1                            | route coupée                  |                         |                         |
| 27/10/1994 | 4                            | route coupée                  | caves inondées          | pièces à vivre inondées |
| 29/12/1994 | 5                            | pollution de puits de captage | pièces à vivre inondées |                         |
| 22/01/1995 | 2                            | pièces à vivre inondées       |                         |                         |
| 23/01/1995 | 1                            | pièces à vivre inondées       |                         |                         |
| 24/01/1995 | 1                            | route coupée                  |                         |                         |
| 25/01/1995 | 9                            | route coupée                  | pièces à vivre inondées | caves inondées          |
| 26/01/1995 | 17                           | route coupée                  | caves inondées          | pièces à vivre inondées |
| 29/01/1995 | 28                           | route coupée                  | caves inondées          | pièces à vivre inondées |
| 30/01/1995 | 2                            | pièces à vivre inondées       | caves inondées          |                         |
| 31/01/1995 | 1                            | route coupée                  | pièces à vivre inondées |                         |
| 24/02/1995 | 1                            | route coupée                  | caves inondées          |                         |
| 25/02/1995 | 5                            | route coupée                  | caves inondées          | pièces à vivre inondées |
| 24/10/1998 | 17                           | route coupée                  | caves inondées          |                         |
| 28/10/1998 | 1                            | pièces à vivre inondées       |                         |                         |
| 30/10/1998 | 6                            | pièces à vivre inondées       | caves inondées          |                         |
| 31/10/1998 | 37                           | route coupée                  | caves inondées          | pièces à vivre inondées |
| 01/11/1998 | 1                            | route coupée                  | caves inondées          | pièces à vivre inondées |
| 18/12/1999 | 4                            | caves inondées                |                         |                         |
| 19/12/1999 | 21                           | caves inondées                | caves inondées          | pièces à vivre inondées |
| 26/12/1999 | 38                           | route coupée                  | caves inondées          | pièces à vivre inondées |
| 13/04/2000 | 2                            | pièces à vivre inondées       | caves inondées          |                         |
| 08/11/2000 | 1                            | route coupée                  |                         |                         |
| 20/11/2000 | 3                            | route coupée                  | caves inondées          |                         |

Tableau 16 : Synthèse de la base de données établie à partir des informations de la presse

On obtient ainsi, sur la période 1992-2000, soit 9 ans, un total de 31 événements, soit plus que le nombre d'événements total issu du fichier CatNat. Cela s'explique en partie par une meilleure définition des dates : ainsi, pour la période de janvier 1995 que nous avons citée en exemple précédemment, on dispose ici de 8 dates, au lieu d'une seule période. Une certaine imprécision demeure cependant : il n'est pas toujours aisé, à la lecture d'un article, de distinguer la journée civile (de minuit à minuit) de la journée météorologique (de 6h TU à 6h TU). Des regroupements entre dates voisines ont donc parfois dû être effectués pour rapprocher cette information des autres sources, notamment des données hydrologiques de la DIREN (voir le paragraphe suivant). Par exemple, les événements des 18 et 19 décembre 1999 seront finalement affectés au 19 décembre. Néanmoins, ces informations facilitent la comparaison ultérieure avec les données pluviométriques.

Si ces données se révèlent finalement être un progrès potentiel par rapport aux précédentes, elles en partagent certaines limites et en apportent d'autres. Tout d'abord, la constatation de dégâts s'appuie sur des témoignages humains intrinsèquement subjectifs (la notion de subjectivité ne signifiant pas qu'on doute *a priori* de ces témoignages, mais a pour effet de rendre moins facile la comparaison ultérieure avec des données numériques de pluviométrie). De même, des dégâts peuvent se produire sans que la presse en soit informée, ou qu'elle souhaite publier l'information. Ceci est d'autant plus probable sur des événements locaux et d'intensité moyenne.

A titre d'exemple, on trouvera en annexe un extrait cartographique de la base de données pour un événement particulier.

#### 4.8. Mesure des débits par la DIREN

Les dernières sources d'information disponibles sont les mesures de débit en rivière effectuées régulièrement par la DIREN Haute-Normandie.

Celles-ci sont effectuées sur les principaux bassins versants du département et sont maintenant automatisées. On dispose ainsi d'hydrogrammes continus sur les principales rivières du département. Il suffit de les consulter pour relever les crues, et leurs caractéristiques.

Parmi cet ensemble de postes, nous n'avons utilisé que les postes de notre zone d'étude dont les fréquences de retour étaient connues. La carte de la Figure 22 ci-dessous indique l'emplacement de ces postes.

Ces cours d'eau sont : l'Austreberthe, le Dun, la Ganzeville, la Saône, la Durdent et le Commerce. Comme on le voit, les points de mesure sont situés à une position assez variable vis-à-vis de l'exutoire.

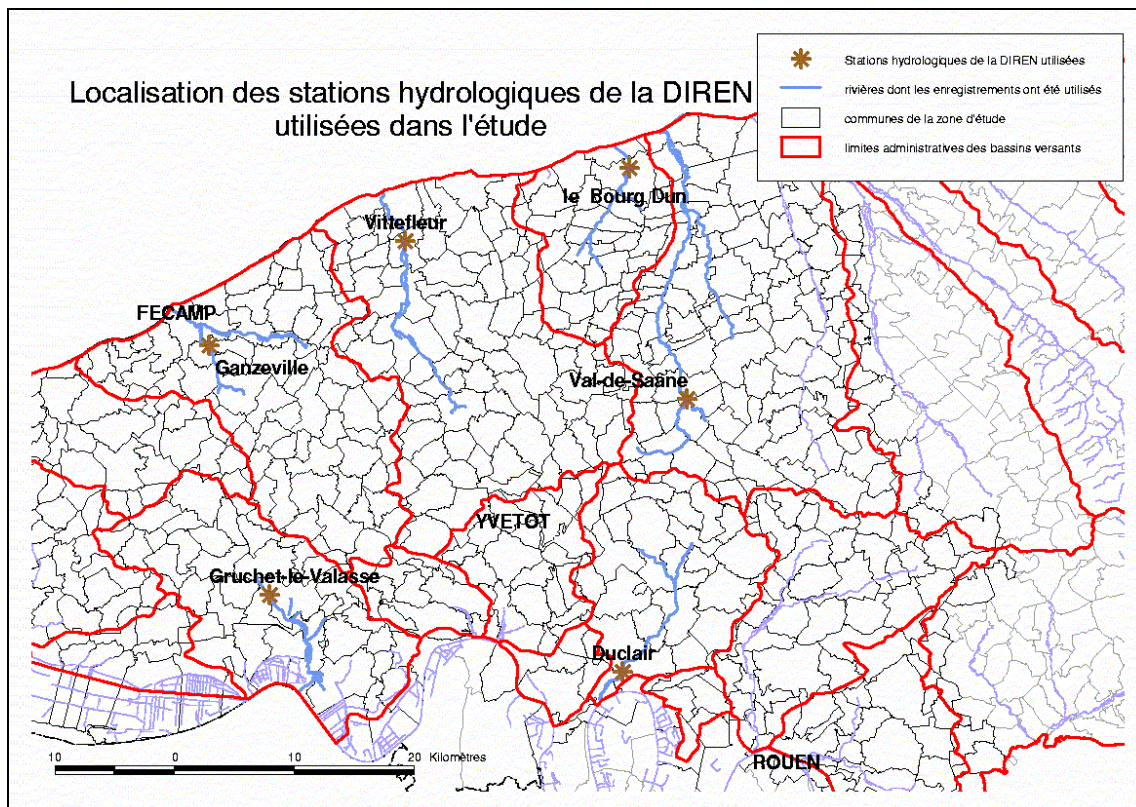


Figure 22 : emplacement des stations de mesures de débit de la DIREN utilisées dans notre étude

S'il est difficile de traduire directement les débits mesurés en dégâts potentiels, on sait néanmoins que des débits importants sont corrélés avec de forts ruissellements en amont.

Ainsi, lorsque les débits atteignent des valeurs de fréquence rare, la suspicion de dégâts hydrologiques est plus forte. Ces fréquences sont généralement données sous la forme de « durées de retour », soit la probabilité moyenne de dépasser chaque année un certain seuil. Pour estimer directement les durées de retour, on réalise le plus souvent un ajustement de la série chronologique des mesures sur une loi statistique définie *a priori*. Il est néanmoins nécessaire que la série chronologique soit suffisamment longue pour cela. D'autres moyens, plus indirects, existent aussi pour calculer des durées de retour de débit : on utilise alors une modélisation hydrologique à partir des caractéristiques physiques des bassins versants, ou une extrapolation à partir d'un bassin versant voisin bien connu (méthode Crupedix).

Pour hiérarchiser les crues enregistrées, nous avons donc retenu le seul critère du débit de pointe  $Q_p$ , à répartir sur quelques classes.

A titre indicatif, pour l'instruction des données CatNat, la durée de retour décennale va souvent de pair avec la décision de retenir comme anormale l'intensité du phénomène. Cependant, il s'agit là de données en principe locales. Les mesures de débits considérées ici résultent déjà d'une intégration spatiale relativement forte (voir Figure 22). Dans ces conditions, une durée de retour de 2 ans, peut correspondre à l'existence en amont de valeurs locales plus fortes (5 ans ou 10 ans par exemple). D'où le choix des classes sur lesquelles seront répartis le débits de pointe ( $Q_n$  est le débit instantané de fréquence de retour  $n$  ans) :

$$Q_p < Q_2$$

$$Q_2 \leq Q_p < Q_5$$

$$Q_5 \leq Q_p < Q_{10}$$

$$Q_p \geq Q_{10}$$

Pour les différentes stations utilisées, les valeurs de fréquences de retour ne sont pas toutes de même qualité (Tableau 17), et il faut compter avec des particularités locales :

- la station de Duclair a été définitivement arrêtée en février 1999, une autre a été ouverte à Saint Paër, mais les fréquences de retour des débits instantanés n'y sont pas connues ;
- au Bourg-Dun, les forts débits (approximativement à partir de  $Q_5$ ) sont sous-estimés, car un lit secondaire, sec d'ordinaire, est occupé par la rivière ;
- à Val de Saône, la courbe de tarage n'est pas définie pour les hauteurs supérieures à 85 cm, et les débits instantanés de fréquences de retour 2 et 5 ans sont extrapolés à partir d'une valeur décennale modélisée.

| station            | rivière      | début      | fin        | origine des valeurs de |           |           |
|--------------------|--------------|------------|------------|------------------------|-----------|-----------|
|                    |              |            |            | $Q_2$                  | $Q_5$     | $Q_{10}$  |
| Duclair            | Austreberthe | 16/06/1965 | 04/02/1999 | DIREN                  | DIREN     | DIREN     |
| Vittefleur         | Durdent      | 16/11/1985 |            | DIREN                  | DIREN     | DIREN     |
| Bourg-Dun          | Dun          | 01/01/1995 |            | DIREN                  | DIREN     | extrapolé |
| Ganzeville         | Ganzeville   | 20/03/1980 |            | DIREN                  | DIREN     | DIREN     |
| Gruchet le Valasse | Commerce     | 12/08/1994 |            | DIREN                  | DIREN     | DIREN     |
| Val de Saône       | Saône        | 31/07/1997 |            | extrapolé              | extrapolé | Hydratec  |

Tableau 17 : stations hydrologiques de la DIREN utilisées pour l'étude ( $Q_n$  est le débit de fréquence de retour  $n$  ans) (source : DIREN)

Cette sélection permet ainsi de retenir près de 40 dates (Tableau 18). La comparaison entre les stations et la valeur des intervalles de durées de retour apporte bien sûr des éléments sur l'intensité de l'événement : ainsi, le 29 janvier 1995, 3 stations observent un débit supérieur au débit de fréquence de retour 5 ans ( $Q_5$ ), et 2 d'entre elles ont vu passer un débit

supérieur à  $Q_{10}$ . Dans d'autres cas (exemple du 15 décembre 2000), on n'observe qu'un débit supérieur à 2 ans sur une seule station.

| Dates    | Données DIREN<br>(gamme de durée de retour) |            |            |         |              |           |
|----------|---|------------|------------|---------|--------------|-----------|
|          | Gruchet                                     | Ganzeville | Vitteffeur | Duclair | Val de Saône | Bourg-Dun |
| 29/10/92 | X   | 2-5        | -          | -       | X            | X         |
| 06/12/92 | X   | -          | -          | 5-10    | X            | X         |
| 12/01/93 | X   | -          | -          | 2-5     | X            | X         |
| 13/10/93 | X   | -          | 2-5        | -       | X            | X         |
| 20/12/93 | X   | -          | 2-5        | >10     | X            | X         |
| 23/12/93 | X   | -          | 2-5        | 5-10    | X            | X         |
| 30/12/93 | X   | -          | -          | 5-10    | X            | X         |
| 27/10/94 | -   | -          | 2-5        | -       | X            | X         |
| 29/12/94 | -   | -          | 2-5        | 2-5     | X            | X         |
| 22/01/95 | -   | -          | 2-5        | 2-5     | X            | 2-5       |
| 25/01/95 | -   | -          | 2-5        | 5-10    | X            | 2-5       |
| 26/01/95 | -   | 2-5        | 2-5        | 2-5     | X            | 2-5       |
| 27/01/95 | -   | -          | 2-5        | 5-10    | X            | 2-5       |
| 29/01/95 | -   | >10        | >10        | 5-10    | X            | 2-5       |
| 17/02/95 | -   | -          | 2-5        | 2-5     | X            | -         |
| 25/02/95 | -   | 2-5        | 2-5        | 5-10    | X            | 2-5       |
| 03/03/95 | -   | -          | 2-5        | -       | X            | 2-5       |
| 07/03/95 | -   | -          | 2-5        | 2-5     | X            | -         |
| 08/03/95 | -   | -          | 2-5        | -       | X            | -         |
| 24/04/95 | -   | -          | -          | 2-5     | X            | -         |
| 24/10/98 | -   | X          | -          | 5-10    | >10          | 2-5       |
| 30/10/98 | -   | X          | -          | 2-5     | -            | 2-5       |
| 31/10/98 | -   | X          | 2-5        | 5-10    | >10          | 2-5       |
| 16/01/99 | -   | -          | -          | 2-5     | 2-5          | -         |
| 27/01/99 | -   | -          | -          | 5-10    | 2-5          | -         |
| 03/10/99 | -   | -          | 2-5        | X       | -            | -         |
| 18/12/99 | -   | 2-5        | 2-5        | X       | >10          | 2-5       |
| 24/12/99 | >10   | 2-5        | 5-10       | X       | >10          | 2-5       |
| 26/12/99 | >10   | X          | >10        | X       | >10          | 5-10      |
| 13/04/00 | -   | 2-5        | 5-10       | X       | -            | 2-5       |
| 10/10/00 | -   | -          | 2-5        | X       | 2-5          | -         |
| 05/11/00 | -   | 2-5        | -          | X       | 2-5          | 2-5       |
| 06/11/00 | -   | 2-5        | -          | X       | -            | 2-5       |
| 08/11/00 | -   | 2-5        | 2-5        | X       | -            | 2-5       |
| 12/11/00 | -   | 2-5        | -          | X       | 2-5          | 2-5       |
| 20/11/00 | -   | 2-5        | >10        | X       | >10          | 2-5       |
| 15/12/00 | -   | -          | 2-5        | X       | -            | -         |

Tableau 18 : liste des dates d'événements retenues à partir des débits mesurés par la DIREN (un tiret (-) correspond à des durées de retour inférieures à  $Q_2$ , une croix (X) correspond à une absence de mesure).

Ainsi, ce type d'information permet d'obtenir des valeurs numériques « objectives ». En revanche, il ne s'agit pas d'observation directe d'existence de dommages occasionnés par les inondations. Il y a donc une bonne complémentarité avec les informations parues dans la presse.

## 5. Constitution d'une base d'événements hydrologiques

### 5.1. Objectif recherché

La méthodologie que nous avons envisagée au démarrage de l'étude consistait d'une part en une comparaison entre les données pluviométriques au pas de temps quotidien et les dossiers CatNat, couvrant une zone assez large et une durée de près de 20 ans, et d'autre part en une analyse de la base de données AREAS (mesures à pas de temps fin de pluie et de ruissellement sur trois bassins de petite taille).

Les imprécisions sur les datations des événements CatNat pour ce type de pluie nous ont amené à considérer d'autres types de données relatives aux désordres hydrologiques, à savoir les documents issus de la presse régionale et locale ainsi que les données de débit recueillies par la DIREN Haute-Normandie.

Ces données se sont finalement avérées relativement riches, et permettent potentiellement d'analyser un nombre plus élevé d'événements. Néanmoins, aucune d'entre elles ne semble « auto-suffisante », et c'est leur complémentarité que nous allons chercher à utiliser pour atteindre notre objectif. Toutefois, la complexité de cette analyse est *a priori* fortement accrue dans la mesure où les informations proviennent de sources, de définitions spatio-temporelles et de durées d'archivage différentes, comme l'illustre le Tableau 19 ci-dessous.

|                              | <b>CatNat</b>        | <b>Presse</b>         | <b>DIREN</b>      | <b>AREAS</b>            |
|------------------------------|----------------------|-----------------------|-------------------|-------------------------|
| <b>Type de données</b>       | Qualitatif           | Qualitatif            | Numérique         | Numérique               |
| <b>Extension spatiale</b>    | Toute la zone        | Toute la zone         | Bassins à l'amont | Petits bassins versants |
| <b>Résolution temporelle</b> | Un à plusieurs jours | Meilleure que le jour | Quelques minutes  | Quelques minutes        |
| <b>Résolution spatiale</b>   | Commune              | Commune               | Surface bassin    | Surface bassin          |
| <b>Nombre d'événements</b>   | 22                   | 31                    | 37                | 26                      |
| <b>Profondeur d'archive</b>  | Depuis 1982          | Depuis 1992           | Variable          | Variable (1995-2000)    |

Tableau 19 : caractéristiques générales des sources d'information utilisées

Dès lors, la difficulté est de définir une méthodologie permettant de synthétiser ces données. En effet, à partir de 4 sources de données, la recherche de relations 2 à 2 correspond déjà à 6 analyses différentes.

Pour éviter ces difficultés, on change de perspective, et on considère dorénavant que toute date recensée par l'une de ces sources correspond à un événement hydrologique donné, et que chacune des observations qui est faite apporte une description partielle de cet événement. Cela nous conduit tout naturellement à constituer une base d'événements de désordres hydrologiques, dont la caractéristique primaire est la date.

On remarque par ailleurs que pour les événements antérieurs à 1992, seuls les dossiers CatNat sont disponibles de façon exhaustive, ce qui est insuffisant. Par conséquent, on se limitera à la période du 1<sup>er</sup> janvier 1992 au 31 décembre 2000, soit 9 années complètes.

Bien entendu, l'une des difficultés majeures de cet exercice est de pouvoir regrouper les dates caractérisant le même événement, afin d'éviter les doublons artificiels. Cela nous a obligés à une analyse qualitative assez fine de chacune des dates.

## 5.2. Réalisation d'un outil cartographique

Pour réaliser cet important travail de mise en cohérence des données et de regroupement des dates, nous nous sommes très largement appuyés sur les possibilités des logiciels de cartographie.

Ceux-ci permettent en effet de particulariser les principaux éléments présents dans les données, à savoir le contour des communes, des bassins-versants, les postes de mesure, etc...

Pour chacun des événements, nous avons superposé ces éléments afin de donner l'image complète. Ainsi, pour le 6 décembre 1992, nous avons successivement montré les communes reconnues au titre des CatNat et celles où des dégâts avaient été rapportés par la presse (cf. annexes). Ci-dessous, on représente l'ensemble des informations disponibles pour cet événement.

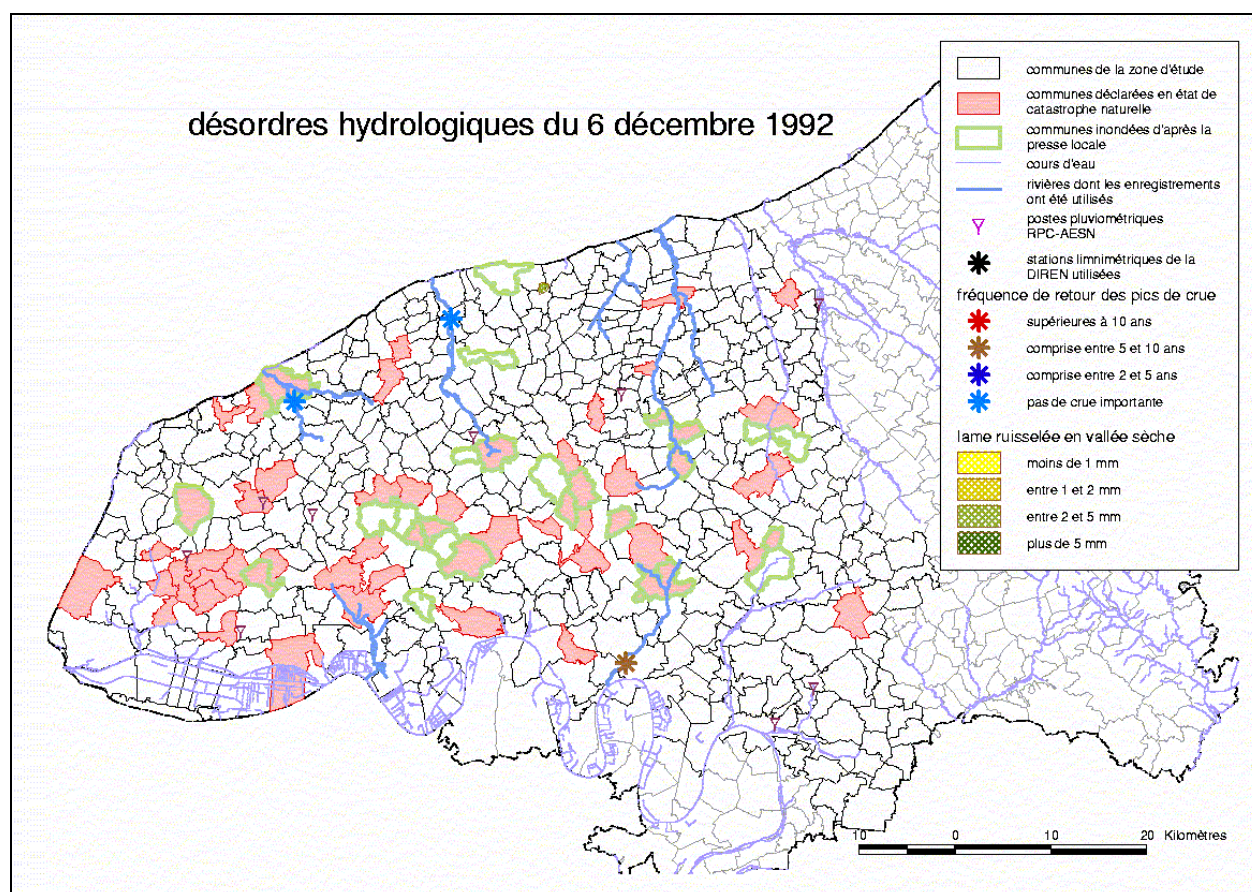


Figure 23 : un exemple de cartographie synthétique (événement du 6 décembre 1992)

Sur ce cas précis, on constate que les informations CatNat et presse sont cohérentes, sans être confondues.

## 5.3. Le classement des événements

L'un des défauts majeurs de notre approche serait cependant d'accorder un poids équivalent à des événements d'importances très différentes. On souhaiterait en effet pouvoir caractériser « l'importance » de l'événement en fonction de son intensité et de son étendue pour les comparaisons ultérieures avec la pluviométrie.

Cet objectif n'est pas a priori facile à atteindre lorsqu'on dispose majoritairement de données qualitatives. C'est pourquoi on se contentera de règles simples, permettant de caractériser chaque événement, et basées sur le principe suivant : plus l'événement a d'importance, plus la probabilité d'avoir été observé par l'un des moyens dont nous disposons est élevée.

On a donc introduit la notion de « classement » des événements, selon une échelle de 3 valeurs (de 1 à 3), en fonction de l'importance relative de l'événement :

- la valeur 1 correspond à un événement détecté soit par un ruissellement AREAS > 1 mm, soit un débit DIREN compris entre 2 et 5 ans de durée de retour, soit une coupure de presse ne concernant qu'une commune ;
- la valeur 3 correspond à un événement ayant sur l'un des sites : un débit DIREN d'une durée de retour > 5 ans, une mention importante dans la presse et une déclaration CatNat (si cette dernière manque et que l'ensemble des débits est important, on attribue également la valeur 3) ;
- la valeur 2 correspond aux multiples situations intermédiaires.

Ce classement a été effectué sur l'ensemble des événements de la base. Dans beaucoup de cas, notamment les cas de classement « 1 » et « 3 », le choix a été facile. En revanche, pour certaines situations intermédiaires, l'expertise s'est révélée plus difficile. On devra donc, lors des analyses ultérieures, manier cette notion de classement avec précaution.

#### **5.4. Le tableau général des événements**

La base de travail finale, représentant l'ensemble des données « hydrologiques » que nous allons utiliser est maintenant définie. Elle est représentée par le tableau ci-dessous :

| Dates    | presse | CatNat | Données DIREN<br>(gamme de durée de retour) |            |            |         |              |           | Données AREAS<br>(lame ruisselée) |             |             | classement |
|----------|--------|--------|---|------------|------------|---------|--------------|-----------|-----------------------------------|-------------|-------------|------------|
|          |        |        | Gruchet                                     | Ganzeville | Vittefleur | Duclair | Val de Saône | Bourg-Dun | Bourville                         | Blosseville | Le Hanouard |            |
| 29/10/92 |        |        | X   | 2-5        | -          | -       | X            | X         | X                                 | 0,70        | X           | 1          |
| 02/12/92 | O      |        | X   | -          | -          | -       | X            | X         | X                                 | 0,74        | X           | 1          |
| 06/12/92 | O      | g2     | X   | -          | -          | 5-10    | X            | X         | X                                 | 2,78        | X           | 3          |
| 12/01/93 |        |        | X   | -          | -          | 2-5     | X            | X         | X                                 | 1,27        | X           | 1          |
| 13/10/93 | O      | g2     | X   | -          | 2-5        | -       | X            | X         | X                                 | 6,84        | X           | 3          |
| 15/12/93 |        | g1     | X   | -          | -          | -       | X            | X         | X                                 | 0,02        | X           | 2          |
| 18/12/93 | O      |        | X   | -          | -          | -       | X            | X         | X                                 | 0,01        | X           | 1          |
| 20/12/93 | O      | g2     | X   | -          | 2-5        | >10     | X            | X         | X                                 | 0,86        | X           | 3          |
| 23/12/93 |        |        | X   | -          | 2-5        | 5-10    | X            | X         | X                                 | 0,32        | X           | 1          |
| 30/12/93 |        | g1     | X   | -          | -          | 5-10    | X            | X         | X                                 | 0,79        | X           | 2          |
| 27/10/94 | O      | g1     | -   | -          | 2-5        | -       | X            | X         | X                                 | 0,49        | -           | 2          |
| 29/12/94 | O      | g1     | -   | -          | 2-5        | 2-5     | X            | X         | X                                 | 1,93        | 1,65        | 2          |
| 22/01/95 | O      | g2     | -   | -          | 2-5        | 2-5     | X            | 2-5       | X                                 | 2,11        | 2,30        | 2          |
| 25/01/95 | O      | g2     | -   | -          | 2-5        | 5-10    | X            | 2-5       | X                                 | 1,91        | 1,43        | 3          |
| 26/01/95 | O      | g2     | -   | 2-5        | 2-5        | 2-5     | X            | 2-5       | X                                 | 1,81        | 2,80        | 2          |
| 27/01/95 |        | g2     | -   | -          | 2-5        | 5-10    | X            | 2-5       | X                                 | 0,63        | 0,55        | 2          |
| 29/01/95 | O      | g2     | -   | >10        | >10        | 5-10    | X            | 2-5       | X                                 | 0,93        | 4,07        | 3          |
| 17/02/95 |        |        | -   | -          | 2-5        | 2-5     | X            | -         | 1,85                              | X           | 0,77        | 1          |
| 25/02/95 | O      |        | -   | 2-5        | 2-5        | 5-10    | X            | 2-5       | 1,84                              | X           | 0,97        | 2          |
| 03/03/95 |        |        | -   | -          | 2-5        | -       | X            | 2-5       | 0,91                              | X           | 0,06        | 1          |
| 07/03/95 |        |        | -   | -          | 2-5        | 2-5     | X            | -         | 0,75                              | X           | 0,02        | 1          |
| 08/03/95 |        |        | -   | -          | 2-5        | -       | X            | -         | X                                 | 0,43        | 0,08        | 1          |
| 24/04/95 |        |        | -   | -          | -          | 2-5     | X            | -         | X                                 | 0,05        | 0,04        | 1          |
| 05/01/98 |        |        | -   | -          | -          | -       | -            | -         | 1,18                              | X           | 0,07        | 1          |
| 24/10/98 | O      |        | -   | X          | -          | 5-10    | >10          | 2-5       | 2,35                              | X           | X           | 3          |
| 30/10/98 | O      |        | -   | X          | -          | 2-5     | -            | 2-5       | 3,01                              | X           | X           | 2          |
| 31/10/98 | O      |        | -   | X          | 2-5        | 5-10    | >10          | 2-5       | 8,91                              | X           | X           | 3          |
| 27/12/98 |        |        | -   | -          | -          | -       | -            | -         | 1,03                              | X           | 0,19        | 1          |
| 16/01/99 |        |        | -   | -          | -          | 2-5     | 2-5          | -         | 1,13                              | X           | 0,26        | 1          |
| 27/01/99 |        |        | -   | -          | -          | 5-10    | 2-5          | -         | 1,06                              | X           | -           | 2          |
| 03/10/99 |        | g1     | -   | -          | 2-5        | X       | -            | -         | 0,22                              | X           | X           | 2          |
| 18/12/99 | O      |        | -   | 2-5        | 2-5        | X       | >10          | 2-5       | 4,71                              | X           | X           | 3          |
| 24/12/99 |        | g2     | >10   | 2-5        | 5-10       | X       | >10          | 2-5       | 5,33                              | X           | X           | 3          |
| 26/12/99 | O      | g2     | >10   | X          | >10        | X       | >10          | 5-10      | 10,7                              | X           | X           | 3          |
| 13/04/00 | O      |        | -   | 2-5        | 5-10       | X       | -            | 2-5       | 1,18                              | 3,96        | -           | 3          |
| 10/10/00 |        |        | -   | -          | 2-5        | X       | 2-5          | -         | X                                 | X           | 0,52        | 1          |
| 05/11/00 |        |        | -   | 2-5        | -          | X       | 2-5          | 2-5       | 2,14                              | X           | 0,57        | 1          |
| 06/11/00 |        |        | -   | 2-5        | -          | X       | -            | 2-5       | 1,77                              | X           | 0,14        | 1          |
| 08/11/00 | O      |        | -   | 2-5        | 2-5        | X       | -            | 2-5       | 2,45                              | X           | 0,39        | 2          |
| 12/11/00 |        |        | -   | 2-5        | -          | X       | 2-5          | 2-5       | 1,62                              | X           | 0,05        | 1          |
| 20/11/00 | O      |        | -   | 2-5        | >10        | X       | >10          | 2-5       | 7,52                              | X           | X           | 3          |
| 15/12/00 |        |        | -   | -          | 2-5        | X       | -            | -         | X                                 | X           | X           | 1          |

Tableau 20 : base d'événements de désordres hydrologiques définitive (voir texte pour la légende)

On a repris ici les notations introduites pour la présentation de chaque donnée. Les éléments complémentaires suivants ont été apportés :

- lorsqu'un événement est relaté dans la presse, la ligne contient un « O » (oui) dans la colonne *presse* ;

- la mention g1 et g2 de la colonne CatNat correspond à l'appartenance aux groupes 1 et 2 du Tableau 15 page 44 ;
- nous avons également fait figurer les lames ruisselées sur les postes AREAS, même quand elles sont inférieures à 1 mm à titre d'information.

### 5.5. Analyse et limites de la base constituée

Cette base rassemble finalement un total de 42 événements, allant d'une simple manifestation de ruissellement à des événements d'inondation généralisée. Parmi ceux-ci, 12 ont été classés 3, 12 également classés 2, et donc 18 classés 1.

Il est important de discuter ici les choix implicites, concernant la notion même d'événement, qui nous ont guidés pour élaborer cette base :

- On considère avant tout qu'un événement est défini au départ par sa date. Même dans le cas où des dommages se situent dans des points différents de la zone d'étude, on considérera l'événement comme unique. Cette simplification est cohérente avec le fait que l'on s'est concentré sur les phénomènes hivernaux, associés à des pluies étendues qui intéressent l'ensemble de la zone. D'ailleurs, si l'on se reporte par exemple à la cartographie du 6 décembre 1992, on voit qu'il serait extrêmement difficile d'individualiser des zones touchées. Cette hypothèse ne serait plus valable si l'on s'intéressait à des événements orageux, bien souvent marqués par un caractère local.
- Quand les événements se produisent de façon répétée sur une courte période (exemple du 22 au 31 janvier 1995), voire sur des journées consécutives (30 et 31 octobre 1998), le choix d'individualiser ces épisodes a été étayé par une analyse très fine des informations de date et d'heure à notre disposition (en particulier les débits DIREN ou AREAS qui permettent de déceler des pointes de débit).

Cette précision est importante, la répartition temporelle de ces dates montrant en effet qu'un grand nombre se regroupe dans des périodes assez restreintes de une à deux semaines : 6 dates en décembre 1993, 5 dates en janvier 1995, 5 dates en novembre 2000, etc...

De même, la répartition annuelle montre évidemment de très grandes disparités : aucun événement pour les saisons hivernales consécutives 1995/1996 et 1996/1997, 13 dates pour la saison 1994/1995.

La répartition saisonnière des événements, qui offre des indications complémentaires, est analysée ci-dessous :

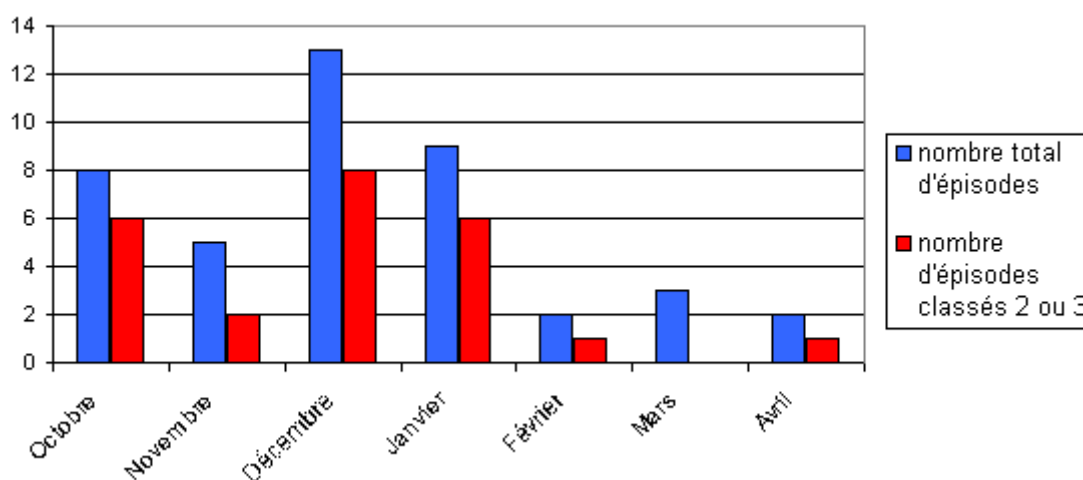


Figure 24 : répartition mensuelle des épisodes

Cette répartition confirme la tendance ressortant de l'analyse des CatNat seules

(Figure 20 page 45) : les épisodes sont essentiellement concentrés en décembre et janvier (22 sur 42). De plus, on note seulement 5 épisodes en novembre, ce qui est peu. Encore faut-il préciser que ce n'est qu'en 2000 que ces épisodes de novembre apparaissent, lors d'une série de 5 événements. Ce minimum relatif de novembre peut surprendre, même si la longueur de l'échantillon (9 ans) est sans doute un peu réduite pour tirer des conclusions trop affirmatives. Notons que ce comportement semble indépendant de la classe de l'événement. Bien entendu, la comparaison ultérieure avec les données pluviométriques fournira des indications sur l'origine de ces variations saisonnières.

## 6. Comparaison de la base d'événements hydrologiques et des données pluviométriques

### 6.1. Rappel du principe général

L'objectif général est ici la comparaison entre la base d'événements hydrologiques qui vient d'être constituée et les données pluviométriques *stricto sensu* (mesurées au pas de temps quotidien).

Dans un premier temps, on se consacrera à la vérification des hypothèses émises par les publications antérieures, à savoir la nécessité de dépasser un seuil de précipitations sur une certaine durée pour déclencher un épisode de désordres hydrologiques importants (condition nécessaire).

Dans la mesure où nous nous intéressons à la faisabilité d'un système d'anticipation de ces désordres, on s'intéressera réciproquement aux cas de dépassement de ces seuils pluviométriques, afin de vérifier s'ils correspondent à des désordres (condition suffisante). On analysera donc simultanément les cumuls décennaux glissants sur la totalité des 9 années d'observation 1992-2000.

Dans les divers travaux que nous avons analysés, un seul poste pluviométrique a été utilisé (généralement celui d'Yvetot) comme référence, sous l'hypothèse implicite que les pluies hivernales étaient structurées de sorte que la mesure en un point donné permettait une évaluation assez générale. Nous testerons également cette hypothèse, par l'utilisation de plusieurs postes de l'Agence de l'Eau situés sur le Plateau de Caux : Goderville, Sommesnil et Saint-Laurent en Caux. A titre de contrôle, les autres postes de l'Agence seront également exploités<sup>3</sup>. Enfin, sur des événements particuliers, on aura recours aux postes de Météo-France, notamment en zone côtière.

Dans tous les cas de figure, l'étude des données pluviométriques va donc consister en une analyse des dépassements de seuils de cumuls sur plusieurs jours.

A titre d'exemple, voici l'évolution de la pluviométrie sur les 3 postes pour la décennie qui a précédé l'épisode du 6 décembre 1992 :

| Date     | Goderville |         | Saint-Laurent |         | Sommesnil |         |
|----------|------------|---------|---------------|---------|-----------|---------|
|          | PI(j)      | PI(10j) | PI(j)         | PI(10j) | PI(j)     | PI(10j) |
| 27/11/92 | 1,9        | 48,2    | 1,6           | 64,1    | 2,1       | 56,9    |
| 28/11/92 | 7,4        | 38,5    | 8,8           | 52,0    | 11,7      | 50,3    |
| 29/11/92 | 2,2        | 40,4    | 4,9           | 56,3    | 0,0       | 49,6    |
| 30/11/92 | 3,0        | 42,8    | 2,0           | 57,7    | 2,5       | 52,1    |
| 01/12/92 | 6,0        | 42,5    | 2,9           | 54,0    | 8,2       | 54,5    |
| 02/12/92 | 13,5       | 55,5    | 19,9          | 72,4    | 13,8      | 67,6    |
| 03/12/92 | 11,2       | 66,3    | 12,8          | 83,7    | 13,9      | 80,5    |
| 04/12/92 | 24,3       | 86,9    | 12,7          | 88,6    | 12,5      | 88,8    |
| 05/12/92 | 6,9        | 77,5    | 7,8           | 80,4    | 8,8       | 83,2    |
| 06/12/92 | 31,8       | 108,2   | 27,2          | 100,6   | 23,9      | 97,4    |

Tableau 21 : Cumuls pluviométriques observés en 3 postes sur la période précédant un événement. La pluie quotidienne PI(j) et le cumul décennal PI(10j) sont reportés (exemple de l'événement du 6/12/1992).

<sup>3</sup> voir le chapitre *Données relatives à la pluviométrie*, page 17

Il ne s'agit que d'un cas particulier, mais qui a l'intérêt de présenter la plupart des traits caractéristiques moyens que l'analyse a mis en évidence.

Ainsi, on peut constater que les cumuls décadaires augmentent progressivement jusqu'au 6 décembre, date à laquelle ils atteignent des valeurs proches aux 3 postes, compris entre 97 mm à Sommesnil et 108 mm à Goderville. On retrouvera dans une majorité d'événements à la fois la proximité dans les valeurs décadaires, et la légère supériorité observée à Goderville.

Le cumul de 80 mm en 10 jours est cependant dépassé dès le 3 à Sommesnil et Saint-Laurent, et seulement le lendemain à Goderville. Le seuil de 90 mm est dépassé le 6 pour les 3 postes. A noter que si le seuil 80 mm est dépassé le 4 à Goderville, il redescend le lendemain à 77 mm, pour remonter ensuite. Doit-on pour autant considérer que la journée du 4 constitue une « période de pluie » à plus de 80 mm ? c'est le type de question que nous aurons à résoudre.

On voit bien ici que les pluies quotidiennes sont un peu moins régulières que les pluies décadaires : on atteint 20 mm à Saint-Laurent le 2 contre 13 mm sur les 2 autres postes, alors qu'on observe 24 mm le 4 à Goderville et 12 mm sur les 2 autres postes. C'est un autre point qui ressort de l'étude sur la majorité des événements.

Sur cet événement, on peut considérer qu'une condition du type « Papy-Douyer », c'est-à-dire : une décade à pluviométrie supérieure à 90 mm se terminant par un jour à plus de 15 mm (pluie génératrice de la crue), est satisfaite le 6. Encore, pour se prononcer, doit-on être sûr de la datation des données. En ce qui concerne les pluies, il s'agit sans ambiguïté de 6h TU à 6 h TU le lendemain. Pour les données de désordre hydrologique, on a vu que l'incertitude demeurerait de l'ordre de la journée.

On pourra également envisager des conditions plus simples et évitant en grande partie des problèmes de datation, comme une condition unique du type « seuil de 90 mm en 10 jours ».

## **6.2. Définition des critères de qualité**

Nous serons donc conduits à tester un ensemble de conditions différentes sur l'ensemble de l'échantillon disponible. Pour cela, il devient utile de définir des indices généraux dans l'objectif de caractériser les « performances » de chaque jeu de conditions.

Pour cela, on définira tout d'abord la notion de « correspondance » entre cumuls de pluie et date de désordre. On définit d'abord par « période de pluie » une période où le cumul sur n jours est supérieur à un certain seuil S (sur l'exemple du Tableau 21 ci-dessus, les périodes de n=10 jours où à plus de S=80 mm sont soulignées en gris clair). Une période pluvieuse sera également caractérisée par le jour de début et le jour de fin.

On considère qu'il y a correspondance entre la période pluvieuse et la date de désordre hydrologique quand cette date fait partie de la période de pluie (en donnant une tolérance de +/- 1 jour).

La notion de correspondance permet de caractériser un événement. Pour avoir une idée synthétique des performances sur l'ensemble de l'échantillon, nous allons systématiser les résultats sous forme de « tables de contingence » basées sur la fréquence des correspondances, qui ont la forme générale suivante :

|                        | P > seuil | P < seuil |
|------------------------|-----------|-----------|
| Désordres hydro        | A         | B         |
| Pas de désordres hydro | C         | D         |

A : nombre de dates de désordres hydrologiques en correspondance avec des périodes de pluie (en quelque sorte, il s'agirait, si nous étions en mode prévision, du nombre de prévisions correctes).

B : nombre de dates de désordres hydrologiques sans correspondance avec des périodes de pluie (l'équivalent de désordres non prévus).

C : nombre de périodes de pluie supérieures au seuil sans correspondance avec des désordres hydrologiques (on parlerait de fausses alertes).

D : absence conjointe de pluie supérieure au seuil et de désordres hydrologiques. Comme la pluie forte est un phénomène essentiellement discontinu et peu fréquent, cette valeur D, par définition fort élevée, n'a pas ici d'intérêt particulier et ne sera pas présentée.

Bien entendu, une bonne correspondance sera caractérisée par une valeur de A élevée et des valeurs de B et C faibles. On pourrait aussi définir des indices, comme le taux de bonnes prévisions  $A/(A+B)$ , de fausses alertes  $C/(A+C)$ , etc...

N'oublions cependant pas qu'il existe une ambiguïté fondamentale dans cette analyse, c'est que l'on compare des dates hydrologiques et des périodes de pluie. Ainsi, pour le paramètre A, on pourrait trouver des valeurs légèrement différentes en prenant comme base le nombre de périodes de pluie au lieu du nombre de dates de désordre.

### **6.3. Résultats sur un poste de référence : Goderville**

Nous allons présenter les premiers résultats en utilisant comme référence le poste de Goderville. Le premier jeu de conditions que nous allons tester est la condition simple, *pluies en 10 jours supérieures à un seuil donné*. Commençons par un seuil de 80 mm.

| <b>dates</b> | <b>classement</b> | <b>correspondance</b> | <b>début</b> | <b>fin</b> | <b>max</b> | <b>décalage</b> |
|--------------|-------------------|-----------------------|--------------|------------|------------|-----------------|
| 29/10/92     | 1                 | oui                   | 23/10        | 2/11       | 135        | -6              |
| 2/12/92      | 1                 | non                   |              |            |            |                 |
| 6/12/92      | 3                 | oui                   | 6/12         | 12/12      | 109        | 0               |
| 12/01/93     | 1                 | oui                   | 13/1         | 15/1       | 88         | +1              |
| 13/10/93     | 3                 | oui                   | 14/10        | 20/10      | 95         | +1              |
| 15/12/93     | 2                 | oui                   | 15/12        | 29/12      | 148        | 0               |
| 18/12/93     | 1                 | oui                   | 15/12        | 29/12      | 148        | -3              |
| 20/12/93     | 3                 | oui                   | 15/12        | 29/12      | 148        | -5              |
| 23/12/93     | 1                 | oui                   | 15/12        | 29/12      | 148        | -8              |
| 30/12/93     | 2                 | oui                   | 15/12        | 29/12      | 148        | -14             |
| 27/10/94     | 2                 | non                   |              |            |            |                 |
| 29/12/94     | 2                 | oui                   | 28/12        | 5/1        | 107        | -1              |
| 22/1/95      | 2                 | oui                   | 23/1         | 6/2        | 199        | +1              |
| 25/1/95      | 3                 | oui                   | 23/1         | 6/2        | 199        | -2              |
| 26/1/95      | 2                 | oui                   | 23/1         | 6/2        | 199        | -3              |
| 27/1/95      | 2                 | oui                   | 23/1         | 6/2        | 199        | -4              |
| 29/1/95      | 3                 | oui                   | 23/1         | 6/2        | 199        | -6              |
| 17/2/95      | 1                 | oui                   | 18/2         | 25/2       | 101        | +1              |
| 25/2/95      | 2                 | oui                   | 18/2         | 25/2       | 101        | -7              |
| 3/3/95       | 1                 | non                   |              |            |            |                 |
| 7/3/95       | 1                 | non                   |              |            |            |                 |
| 8/3/95       | 1                 | non                   |              |            |            |                 |
| 24/4/95      | 1                 | non                   |              |            |            |                 |
| 5/1/98       | 1                 | oui                   | 1/1          | 8/1        | 92         | -3              |
| 24/10/98     | 3                 | oui                   | 24/10        | 9/11       | 167        | 0               |
| 30/10/98     | 2                 | oui                   | 24/10        | 9/11       | 167        | -6              |
| 31/10/98     | 3                 | oui                   | 24/10        | 9/11       | 167        | -7              |
| 27/12/98     | 1                 | non                   |              |            |            |                 |
| 16/1/99      | 1                 | non                   |              |            |            |                 |
| 27/1/99      | 2                 | non                   |              |            |            |                 |
| 3/10/99      | 2                 | oui                   | 2/10         | 8/10       | 113        | -1              |
| 18/12/99     | 3                 | oui                   | 12/12        | 21/12      | 132        | -7              |
| 24/12/99     | 3                 | oui                   | 24/12        | 3/1        | 163        | 0               |
| 26/12/99     | 3                 | oui                   | 24/12        | 3/1        | 163        | -2              |
| 13/4/00      | 3                 | non                   |              |            |            |                 |
| 10/10/00     | 1                 | oui                   | 9/10         | 19/10      | 167        | -1              |
| 5/11/00      | 1                 | oui                   | 1/11         | 15/11      | 189        | -4              |
| 6/11/00      | 1                 | oui                   | 1/11         | 15/11      | 189        | -5              |
| 8/11/00      | 2                 | oui                   | 1/11         | 15/11      | 189        | -7              |
| 12/11/00     | 1                 | oui                   | 1/11         | 15/11      | 189        | -11             |
| 20/11/00     | 3                 | oui                   | 19/11        | 28/11      | 86         | -1              |
| 15/12/00     | 1                 | non                   |              |            |            |                 |

Tableau 22 : tableau des correspondances, poste de Goderville. Conditions testées : 80 mm en 10 jours (voir texte pour la signification des colonnes)

Dans ce tableau, la date et le classement de chaque événement sont rappelés. Les correspondances (avec la définition donnée ci-dessus) sont représentées de façon binaire (oui/non). Le début et la fin sont ceux de la période de pluie supérieure au seuil. La colonne max donne la valeur maximale du cumul 10 jours au cours de la période (elle ne coïncide pas forcément avec la date de l'événement hydrologique). La notion de décalage indique la différence en nombre de jours entre la date du début de la période pluvieuse et celle de l'événement. Une valeur négative correspond à un début d'événement postérieur au début de

la période pluvieuse, et l'existence de la valeur « +1 » correspond à la tolérance que l'on s'est donnée pour le critère de correspondance.

On note ici que la correspondance est positive pour 31 événements sur 42 au total, soit une proportion de près de 75%, résultat encourageant. Cela signifie donc que près de  $\frac{3}{4}$  des événements se sont produits dans des périodes de cumul supérieur à 80 mm en 10 jours.

Si l'on affine l'analyse, et que l'on considère les 11 événements pour lesquels la correspondance n'est pas assurée, on constate qu'il s'agit dans 8 cas d'événements de classe 1, c'est-à-dire de faible importance. Seuls 3 événements de classe 2 ou 3 ne coïncident pas avec une période de pluie de ce type ; nous nous attacherons à décrire plus en détail ces événements dans la suite de l'analyse. Ce résultat est donc particulièrement encourageant.

En ce qui concerne les décalages, les résultats bruts sembleraient indiquer un nombre important de cas de valeurs négatives. N'oublions pas cependant qu'il s'agit dans beaucoup de cas de périodes comportant beaucoup d'événements. Reprenons l'exemple de janvier 1995 : le franchissement du seuil de 80 mm en 10 jours se produit le 23. Les pluies vont continuer à se succéder jusqu'au 29, où le cumul atteint la valeur très élevée de 199 mm. Dans ces conditions, il n'est pas étonnant que des désordres continuent à se produire, et le fait que le décalage soit de 6 jours après le franchissement du seuil ne saurait remettre en cause l'analyse.

Après avoir étudié les seuils de pluie survenus pendant les événements, il est nécessaire de considérer les éventuels cas de dépassement de seuil qui n'ont pas provoqué de désordre. Il sont représentés ci-après :

| <b>Début</b> | <b>Fin</b> | <b>Maximum (mm)</b> |
|--------------|------------|---------------------|
| 4/11/94      | 7/11/94    | 107                 |
| 18/11/94     | 18/11/94   | 80                  |
| 25/11/96     | 29/11/96   | 92                  |
| 3/12/96      | 3/12/96    | 81                  |
| 16/4/98      | 17/4/98    | 82                  |
| 20/4/00      | 20/4/00    | 90                  |

Tableau 23 : périodes de cumul de pluie en 10 jours supérieures à 80 mm (Goderville) n'ayant pas de correspondance avec un désordre hydrologique

On note au total 6 « périodes » de ce type, réparties sur 4 années. Trois ont lieu en novembre, une en décembre et 2 en avril. On remarquera leur durée très limitée (5 jours pour le maximum, et seulement une journée pour 3 d'entre elles). Le maximum atteint certes 107 mm en novembre 1994, mais reste inférieur à 92 mm pour les autres périodes, et même très proches de 80 mm pour 3 d'entre elles.

Il s'agit donc de périodes se situant juste en limite de définition, et qui n'ont rien en commun avec l'importance de celles qui sont associées aux désordres hydrologiques. Nous les étudierons plus en détail dans une discussion ultérieure.

Nous disposons maintenant de l'ensemble des informations nécessaires à l'établissement des tables de contingence pour ce critère *80 mm en 10 jours* :

|                        | P > seuil | P < seuil |
|------------------------|-----------|-----------|
| désordres hydro        | 31        | 11        |
| pas de désordres hydro | 6         |           |

Tableau 24 : table de contingence pour Goderville (seuil 80 mm en 10 jours)

#### 6.4. Applications à d'autres postes : Saint-Laurent et Sommesnil

L'utilisation des données d'un seul poste, comme c'était le cas pour l'étude INRA, faisait partie des limites potentielles que nous avons identifiées. C'est pourquoi il nous a semblé nécessaire d'analyser les performances sur d'autres postes, comme les deux autres postes du RPC que sont Sommesnil et Saint Laurent en Caux. On a ainsi un assez bon échantillon du Plateau.

L'analyse précédente a été reconduite, et on montre directement ici la table de contingence des résultats obtenus sur Saint-Laurent, dans les conditions identiques aux précédentes :

|                        | P > seuil | P < seuil |
|------------------------|-----------|-----------|
| désordres hydro        | 25        | 12        |
| pas de désordres hydro | 7         |           |

Tableau 25 : Saint-Laurent, seuil 80 mm sur 10 jours

A noter que les données du poste se sont arrêtées avant les événements de l'automne 2000, ce qui fait que seulement 37 événements sur les 42 de la base de données hydrologiques ont été traités.

On obtient ainsi 25 cas de bonne correspondance sur les 37 étudiés, soit un taux de 67%, légèrement inférieur aux résultats de Goderville. Les résultats sont légèrement en retrait par rapport à Goderville, néanmoins l'absence des derniers événements de 2000, bien vus sur Goderville, pourrait expliquer la différence. Le nombre de périodes de fausse alerte est sensiblement le même (7 au lieu de 6).

Au-delà de ces données globales, on a pu également constater que les événements où les correspondances étaient ou non assurées étaient les mêmes que pour Goderville.

Le test a ensuite été mené sur le poste de Sommesnil :

|                        | P > seuil | P < seuil |
|------------------------|-----------|-----------|
| désordres hydro        | 27        | 15        |
| pas de désordres hydro | 7 (5)     |           |

Tableau 26 : Sommesnil, seuil 80 mm sur 10 jours

Là aussi les résultats sont un peu en retrait (15 événements non prévus), mais le seuil de 80 mm est peut-être un peu élevé sur ce poste. Par ailleurs, après analyse, le nombre d'alertes non prévues semble élevé (7), mais on note que pendant la période du 8 au 14 avril

1994, le seuil de 80 mm a été franchi 3 fois, suite à un effet de « montagnes russes ». Si l'on considère la période comme unique, le nombre de fausses alertes descend à 5.

Quoi qu'il en soit, on voit que ces performances restent proches, même si on sent que le seuil mériterait d'être un peu adapté pour chaque poste. Une perspective complémentaire pourrait être d'analyser la série commune des 3 postes sous les conditions du type « seuil de 80 mm à Goderville ou 75 mm à Saint-Laurent ou 75 mm à Sommesnil » et d'examiner le tableau de correspondance obtenu.

Ainsi, les résultats obtenus sur les 3 postes du Plateau de Caux restent très proches lorsqu'on utilise ce critère, à la fois globalement et événement par événement. Le fait d'utiliser un poste de référence unique pour ce type d'événement paraît donc validé.

Dans la suite de l'étude, nous garderons le poste de Goderville comme référence, pour les raisons suivantes :

- il présente des résultats légèrement meilleurs ;
- comme il s'agit d'un poste automatique, une éventuelle extension à des analyses fines en sera facilitée.

## **6.5. Variation des seuils et durées de cumul sur le poste de Goderville**

### **6.5.1. Durées de cumul courtes**

Même si les résultats semblent encourageants lorsque l'on considère le seuil de cumul de pluie de 80 mm en 10 jours, il convient de vérifier si d'autres valeurs fournissent des résultats comparables, notamment pour les pluies directement associées aux désordres hydrologiques. On peut en effet se demander *a priori* si des solutions triviales du type « 20 mm en une journée » ne suffiraient pas à décrire le lien entre pluie et inondations. La table de contingence de ce seuil se trouve dans le Tableau 27 :

|                        | P > seuil | P < seuil |
|------------------------|-----------|-----------|
| Désordres hydro        | 26        | 16        |
| Pas de désordres hydro | 23        |           |

Tableau 27 : seuil de 20 mm en 24h, Goderville

Ici, on voit notamment que le nombre de fausses alertes est très élevé : sur 50 périodes d'une journée au moins où on observe plus de 20 mm en 1 jour, près de la moitié ne correspond pas à des désordres hydrologiques<sup>4</sup>. Mais peut-être peut-on considérer que le seuil est trop faible.

Or, le nombre de désordres hydrologiques correspondant à des seuils de 20 mm ne représente que 26/42 cas, soit seulement les deux tiers de la base d'événements hydrologiques majeurs, ce qui est inférieur aux résultats obtenus sur 80 mm en 10 jours.

Ainsi, si l'on cherchait à remonter ce seuil de 20 mm pour diminuer le nombre de fausses alertes, le nombre de mauvaises prévisions diminuerait également.

Bien sûr, l'incertitude sur la datation pourrait expliquer en partie ces résultats mitigés. C'est pourquoi on reprend la simulation avec une durée de cumul légèrement supérieure, soit 2 jours, et un seuil de 40 mm.

<sup>4</sup> lorsque la pluie dépasse 20 mm pendant 2 jours consécutifs, on ne compte qu'une période, dont la durée est de 2 jours, pour rester cohérent avec le calcul de seuils sur 10 jours par exemple

|                        | P > seuil | P < seuil |
|------------------------|-----------|-----------|
| Désordres hydro        | 21        | 21        |
| Pas de désordres hydro | 4         |           |

Tableau 28 : seuil de 40 mm en 48 h, Goderville

Ici, on a diminué le nombre de fausses alertes (seulement 4), mais au prix d'une diminution des bonnes prévisions (1 cas sur 2, simplement). De même que ci-dessus, un abaissement du seuil (par exemple 30 mm) permettrait d'augmenter le nombre de bonnes prévisions, au prix d'une forte augmentation de fausses alertes.

Ces résultats confortent l'hypothèse de départ : les désordres hydrologiques d'hiver correspondent davantage à des périodes pluvieuses de plusieurs jours qu'à des pluies concentrées sur 1 ou 2 journées.

### 6.5.2. Durées de cumul longues

Inversement, nous avons également cherché à augmenter la durée du cumul. A titre d'exemple, nous avons choisi de présenter ici la durée de 30 jours, qui correspond d'une part à une durée mensuelle, et qui avait été par ailleurs évoquée dans les travaux relatifs à la turbidité des captages (LEROY, 1998). On choisit de présenter deux seuils : 150 et 190 mm.

|                        | P > seuil | P < seuil |
|------------------------|-----------|-----------|
| désordres hydro        | 34        | 8         |
| pas de désordres hydro | 14        |           |

Tableau 29 : seuil de 150 mm en 30 j, Goderville.

On voit ici que la proportion d'événements en correspondance est bonne (35/43), mais que par contre le nombre de périodes de fausse alerte (14) est important. Il convient alors de tester un seuil un peu plus élevé.

|                        | P > seuil | P < seuil |
|------------------------|-----------|-----------|
| Désordres hydro        | 26        | 16        |
| Pas de désordres hydro | 5         |           |

Tableau 30 : Goderville, 190 mm en 30 j.

Les résultats vont dans le sens attendu, puisque l'élévation du seuil diminue le nombre de fausses alertes, mais diminue aussi ceux des événements bien « prévus ». Remarquons de plus que les résultats tels qu'ils apparaissent ici sont très proches de ceux obtenus avec le seuil 80 mm en 10 jours.

Néanmoins, ce calcul est quelque peu artificiel en terme prédictif. En effet, ci-dessous on reporte les périodes pendant lesquelles le seuil est dépassé. On voit que ces périodes peuvent devenir très longues ; c'est par exemple le cas de la dernière période, qui dure du 10 octobre au 18 décembre 2000. En terme de correspondance, la réponse est positive, puisque les divers épisodes de l'automne 2000 sont inclus. Pour autant, on ne peut pas dire que la mise

en alerte doit être maintenue pendant plus de 2 mois... L'extrapolation de la méthode établie sur des durées de quelques jours produit donc des effets inattendus.

| <b>Goderville</b> |                   |            |
|-------------------|-------------------|------------|
|                   | <b>Durée(j)</b>   | <b>30</b>  |
|                   | <b>seuil(mm):</b> | <b>190</b> |
| Date début        | Date fin          | maxi       |
| 27/10/92          | 04/11/92          | 239        |
| 10/11/92          | 21/11/92          | 223        |
| 06/12/92          | 09/12/92          | 217        |
| 14/06/93          | 18/06/93          | 208        |
| 14/10/93          | 14/10/93          | 191        |
| 22/12/93          | 17/01/94          | 290        |
| 14/11/94          | 25/11/94          | 233        |
| 29/12/94          | 06/01/95          | 220        |
| 22/01/95          | 27/02/95          | 327        |
| 08/03/95          | 11/03/95          | 197        |
| 29/11/96          | 29/11/96          | 192        |
| 02/12/96          | 06/12/96          | 210        |
| 12/09/98          | 21/09/98          | 206        |
| 29/09/98          | 01/10/98          | 197        |
| 29/10/98          | 22/11/98          | 279        |
| 11/10/99          | 11/10/99          | 191        |
| 24/12/99          | 16/01/00          | 299        |
| 10/10/00          | 18/12/00          | 360        |

Tableau 31 : Goderville, périodes de pluie de plus de 150 mm en 30 jours.

On touche ainsi une des limites de l'analyse par correspondance pluie/désordre avec une seule condition de seuil : le diagnostic peut paraître numériquement correct, mais son application en temps réel peut se révéler dans ce type de cas d'un intérêt limité.

En conclusion de ce tour d'horizon concernant les diverses durées et seuils de cumul, il apparaît bien que la durée de 10 jours et un seuil voisin de 80 mm sur Goderville correspondent bien à la meilleure détermination. Nous allons maintenant l'analyser plus en détail.

## **6.6. Seuil de 80 mm en 10 jours sur Goderville : analyse approfondie**

### **6.6.1. Analyse des cas sans correspondance**

#### *Désordres sans pluie > seuil*

Dans ce cas, il est tout d'abord nécessaire de bien vérifier que l'hypothèse de base, c'est-à-dire que la pluie est suffisamment régulière pour pouvoir être représentée par un poste de référence, est valide (pas de pluie locale). Or, comme nous l'avons vu, c'est surtout sur les courtes périodes que cette variation est effective. Naturellement, dans la mesure où la zone d'étude n'est pas complètement couverte par des pluviomètres, cette hypothèse ne pourra être complètement écartée ; en revanche, lorsque des données complémentaires permettent de l'observer, on peut la retenir de façon certaine.

Pour tenter d'y répondre, nous avons procédé très simplement en recueillant les données pluviométriques observées sur des postes autres que les postes de référence testés jusqu'ici :

| dates    | classement | correspondance | God. 10J | God. J | God J-1 | Autre J      | Autre J-1    |
|----------|------------|----------------|----------|--------|---------|--------------|--------------|
| 2/12/92  | 1          | Non            | 55       | 13     | 6       | 20 (St Lau.) |              |
| 27/10/94 | 2          | Non            | 55       | 9      | 7       | 40 (Cany)    | 38 (St Val.) |
| 3/3/95   | 1          | Non            | 65       | 8      | 8       |              | 12 (Font.)   |
| 7/3/95   | 1          | Non            | 43       | 8      | 2       | 15 (Somm.)   |              |
| 8/3/95   | 1          | Non            | 51       | 8      | 8       |              |              |
| 24/4/95  | 1          | Non            | 47       | 19     | 2       | 34 (Font.)   | 13 (Font.)   |
| 27/12/98 | 1          | Non            | 59       | 17     | 19      |              | 25 (St Rom.) |
| 16/1/99  | 1          | Non            | 50       | 15     | 5       | 20 (St Lau.) | 7 (Somm.)    |
| 27/1/99  | 2          | Non            | 44       | 5      | 12      | 8 (Font.)    | 15 (Font.)   |
| 13/4/00  | 3          | Non            | 42       | 9      | 11      | 32 (St Val.) | 43 (St Val.) |
| 15/12/00 | 1          | Non            | 76       | 13     | 11      |              |              |

Tableau 32 : caractéristiques des événements sans dépassement de seuil de pluie (voir le texte pour la signification des différentes colonnes)

Les lignes du Tableau 32 sont celles du Tableau 22 page 61 qui ne présentent pas de correspondance. On y ajoute les valeurs du cumul 10 jours pour Goderville : c'est la colonne *God 10J*. Les deux colonnes suivantes (*God J* et *God J-1*) donnent les valeurs de précipitation aux jours J et J-1 toujours à Goderville. Les deux colonnes de droite représentent les valeurs maximales observées dans les données d'autres postes à notre disposition aux jours J et J-1<sup>5</sup>. Elles ne sont pas renseignées lorsque c'est Goderville qui présente la valeur maximale.

Tout d'abord, il convient de rappeler que sur ces 11 épisodes, 8 sont de classe 1, 2 de classe 2, une seule de classe 3. Ensuite, on note un net regroupement des dates : 3 sont notées entre le 3 et le 8 avril 1995, 3 entre le 27 décembre 1998 et le 27 janvier suivant.

Les cumuls 10J sur Goderville sont sensiblement inférieurs au seuil de 80 mm sauf le 15/12/00. Les valeurs à J et J-1 sont également assez faibles, sauf le 27/12/98. On ne peut donc incriminer a priori des caractéristiques particulières qui rendraient des pluies spécialement « efficaces » sur Goderville pour ces événements.

En revanche, l'existence de pluies localement fortes ailleurs que sur le poste de référence de Goderville est avérée pour au moins 3 événements : 27/10/94, 24/4/95 et 13/4/00. On observerait ainsi 75 mm en 2 jours sur le poste de Saint-Valéry le 27/10/94 ! Des doutes subsistent pour les dates suivantes : 2/12/92, 27/12/98, 16/1/99 et 27/1/99, où les pluies quotidiennes sont voisines de 20 mm sur un poste. Au final, ce sont surtout les 3 dates du 3 au 8 mars 1995 qui posent problème, et le 15/12/00 dans une moindre mesure.

On a par ailleurs la satisfaction de constater que ne subsistent que des épisodes de type 1 dans les dates douteuses, les événements de type 2 et 3 présents dans cet échantillon sont liés à des pluies locales. On voit par ailleurs que les pluies d'avril présentes dans l'échantillon semblent déjà de nature « estivale ».

<sup>5</sup>code des différents postes utilisés :

*St Lau* : Saint Laurent en Caux, *Cany* : Cany-Barville, *St Val* : Saint Valéry en Caux, *Font* : Fontaine sous Préaux, *Somm* : Sommesnil, *St Rom* : Saint Romain de Colbosc

### Absence de désordres et pluie > seuil

Pour les événements dits de « fausse alerte » (pluie > seuil sans désordre hydrologique), il convient réciproquement de tester l'hypothèse qu'il ne s'agit pas de pluies localement fortes sur Goderville.

Nous allons pour cela reprendre les observations de Saint Laurent et Sommesnil. On reprend le seuil de 80 mm, ce qui pourrait être critiquable dans la mesure où les seuils mériteraient peut-être un ajustement par poste.

Sur le tableau suivant, on rappelle les valeurs déjà fournies pour Goderville, et on reporte les cumulés calculés pour les deux autres postes (on reporte « oui » ou « non » selon que le seuil est ou non dépassé) :

| Début    | Fin      | Maxi (mm) | St Laurent | Sommessnil |
|----------|----------|-----------|------------|------------|
| 4/11/94  | 7/11/94  | 107       | Non (68)   | Non (75)   |
| 18/11/94 | 18/11/94 | 80        | Non (71)   | Non (75)   |
| 25/11/96 | 29/11/96 | 92        | Oui (91)   | Oui (98)   |
| 3/12/96  | 3/12/96  | 81        | Oui (83)   | Non (77)   |
| 16/4/98  | 17/4/98  | 82        | Oui (80)   | Non (71)   |
| 20/4/00  | 20/4/00  | 90        | Oui (89)   | Oui (83)   |

Tableau 33 : analyse des événements de pluie>seuil sans désordre

On voit sur ce tableau que seule la séquence du 4 au 7 novembre 1994 présente une valeur nettement supérieure à Goderville. Pour les autres cas, qu'ils soient positifs ou non, les valeurs sont très proches du seuil, et on ne peut imputer la fausse alerte à des pluies locales sur Goderville. Signalons par ailleurs que des fausses alertes existent sur les 2 autres postes et pas sur Goderville, mais nous ne les avons pas analysées en profondeur.

### Synthèse :

La répartition saisonnière des événements a été tracée avec en superposition le nombre de cas pluies > seuil sans désordres (« fausses alertes ») et les désordres sans pluie (« non prévues ») :

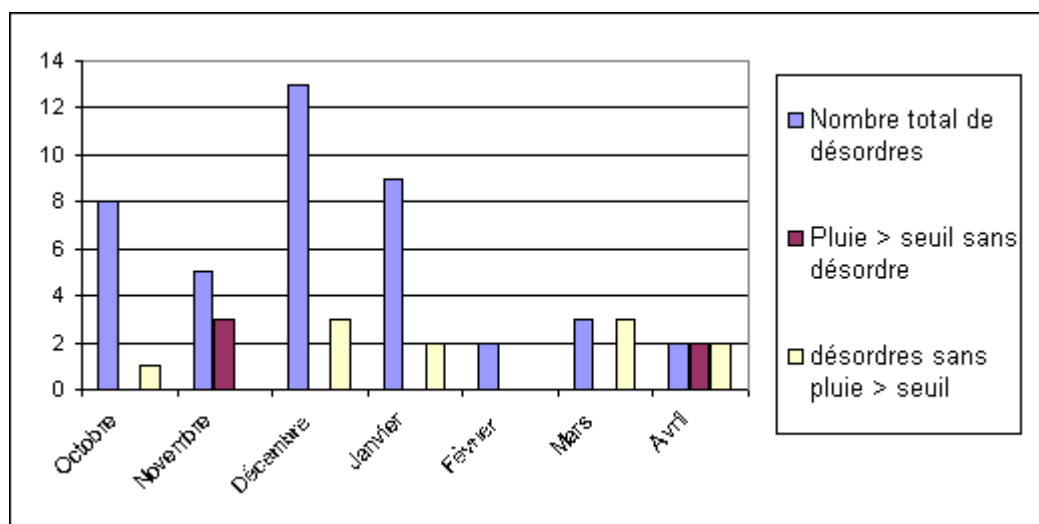


Figure 25 : répartition saisonnière des désordres hydrologiques

Même si l'échantillon est numériquement faible, on voit la tendance saisonnière à ce que ces événements soient en proportion plus nombreux au début et à la fin de l'échantillon, et ce pour des raisons diverses.

Plusieurs événements ou périodes de pluie relatifs au mois d'avril ont été observés dans les échantillons précédents. Si l'on exclut les mois d'avril de l'échantillon global, on observe les modifications suivantes quant aux performances sur l'ensemble de la base :

|                        | P > seuil | P < seuil |
|------------------------|-----------|-----------|
| Désordres hydro        | 31        | 9         |
| Pas de désordres hydro | 4         |           |

Tableau 34 : Goderville, seuil de 80 mm en 10 j, mois d'avril exclus

Le taux d'épisodes en correspondance atteint maintenant 77 %. Qui plus est, le nombre de « fausses alertes » diminue à 4. Cela nous inciterait donc à ne retenir que la période octobre à mars (soit 6 mois) pour la pertinence de cette approche.

### 6.6.2. Prise en compte conjointe de la période pluvieuse initiale et de la pluie génératrice

On essaie dans cette partie de considérer à la fois les correspondances entre la période pluvieuse initiale (ce qui a été fait jusqu'ici) et l'existence d'une pluie génératrice (initialement introduite par l'INRA et fixée à 15 mm).

Rappelons que la difficulté principale réside dans le calcul de la pluie génératrice, compte tenu d'une part de la durée de cumul de 24 h des données pluviométriques, et d'autre part de l'hétérogénéité des pluies, plus sensible pour cette durée. En effet, deux jours consécutifs à 10 mm peuvent aussi bien représenter une pluie de 20 mm en quelques heures à cheval sur la limite entre les deux jours, ou des pluies de 5 mm séparées de plusieurs heures : il est donc difficile dans ce cas de se prononcer sur la pluie « génératrice ». En revanche, si la somme de jours consécutifs est inférieure à 15 mm, ou si une pluie quotidienne est supérieure à 15 mm, la réponse est plus directe.

On réalise ainsi le tableau suivant :

| dates    | classement | Correspondance<br>(Cond1) | God. J | God J-1 | Autre J  | Autre J-1 | God J +J-1 | Cond 2 | Cond 1 et 2 |
|----------|------------|---------------------------|--------|---------|----------|-----------|------------|--------|-------------|
| 29/10/92 | 1          | oui                       | 2      | 32      |          |           | 34         | o      | o           |
| 2/12/92  | 1          | non                       | 13     | 6       | 20(St L) |           | 19         | ?      | n           |
| 6/12/92  | 3          | oui                       | 32     | 7       |          |           | 39         | o      | o           |
| 12/01/93 | 1          | oui                       | 5      | 28      |          |           | 33         | o      | o           |
| 13/10/93 | 3          | oui                       | 23     | 12      | 31(So)   |           | 35         | o      | o           |
| 15/12/93 | 2          | oui                       | 23     | 8       |          |           | 31         | o      | o           |
| 18/12/93 | 1          | oui                       | 18     | 2       |          |           | 20         | o      | o           |
| 20/12/93 | 3          | oui                       | 31     | 20      | 44(St L) |           | 51         | o      | o           |
| 23/12/93 | 1          | oui                       | 23     | 12      | 29(StL)  | 12        | 35         | o      | o           |
| 30/12/93 | 2          | oui                       | 13     | 5       | 16(Ro)   | 6(Ro)     | 18         | ?      | ?           |
| 27/10/94 | 2          | non                       | 9      | 7       | 40(Ca)   | 38(StVal) | 16         | ?      | n           |
| 29/12/94 | 2          | oui                       | 27     | 12      |          |           | 39         | o      | o           |
| 22/1/95  | 2          | oui                       | 29     | 12      | 32(StL)  |           | 41         | o      | o           |
| 25/1/95  | 3          | oui                       | 33     | 24      |          |           | 57         | o      | o           |
| 26/1/95  | 2          | oui                       | 12     | 33      | 16(StL)  |           | 45         | o      | o           |
| 27/1/95  | 2          | oui                       | 18     | 12      |          |           | 30         | o      | o           |
| 29/1/95  | 3          | oui                       | 42     | 15      |          |           | 57         | o      | o           |
| 17/2/95  | 1          | oui                       | 9      | 17      |          |           | 26         | o      | o           |
| 25/2/95  | 2          | oui                       | 2      | 21      |          | 25(Fo)    | 23         | o      | o           |
| 3/3/95   | 1          | non                       | 8      | 8       |          | 12(Fo)    | 16         | ?      | n           |
| 7/3/95   | 1          | non                       | 8      | 2       | 15(So)   |           | 10         | n      | n           |
| 8/3/95   | 1          | non                       | 8      | 8       |          |           | 16         | ?      | n           |
| 24/4/95  | 1          | non                       | 19     | 2       | 34(Fo)   | 13(Fo)    | 21         | o      | n           |
| 5/1/98   | 1          | oui                       | 11     | 13      | 18(StL)  | 16(StL)   | 24         | o      | o           |
| 24/10/98 | 3          | oui                       | 40     | 20      |          |           | 60         | o      | o           |
| 30/10/98 | 2          | oui                       | 11     | 11      | 14(StR)  | 25(StL)   | 22         | ?      | ?           |
| 31/10/98 | 3          | oui                       | 51     | 11      |          | 14(StR)   | 62         | o      | o           |
| 27/12/98 | 1          | non                       | 17     | 19      |          | 25(StR)   | 36         | o      | n           |
| 16/1/99  | 1          | non                       | 15     | 5       | 20(StL)  | 7(So)     | 20         | o      | n           |
| 27/1/99  | 2          | non                       | 5      | 12      | 8(Fo)    | 15(Fo)    | 17         | ?      | n           |
| 3/10/99  | 2          | oui                       | 23     | 14      | 35(StL)  |           | 37         | o      | o           |
| 18/12/99 | 3          | oui                       | 29     | 20      |          |           | 49         | o      | o           |
| 24/12/99 | 3          | oui                       | 50     | 0       |          |           | 50         | o      | o           |
| 26/12/99 | 3          | oui                       | 13     | 40      |          |           | 53         | o      | o           |
| 13/4/00  | 3          | non                       | 9      | 11      | 32(StV)  | 43(StV)   | 20         | ?      | n           |
| 10/10/00 | 1          | oui                       | 31     | 50      |          |           | 80         | o      | o           |
| 5/11/00  | 1          | oui                       | 29     | 7       | 45(He)   | 20(He)    | 36         | o      | o           |
| 6/11/00  | 1          | oui                       | 37     | 29      |          |           | 66         | o      | o           |
| 8/11/00  | 2          | oui                       | 16     | 11      | 24(StR)  | 17(StR)   | 27         | o      | o           |
| 12/11/00 | 1          | oui                       | 20     | 8       |          |           | 28         | o      | o           |
| 20/11/00 | 3          | oui                       | 6      | 29      | 8(He)    | 35(He)    | 35         | o      | o           |
| 15/12/00 | 1          | non                       | 13     | 11      |          | 13(Fo)    | 24         | ?      | n           |

Tableau 35 : Goderville, (seuil et durée pluie initiale : 80 mm et 10j)

Quelques explications sur la signification des colonnes :

- Cond 1 : condition pluie initiale supérieure au seuil de 80 mm en 10 jours ;
- P(J) ailleurs, P(J-1) ailleurs : comme dans le Tableau 32, on note ces valeurs quand elles sont supérieures à celle de Goderville sur les autres postes ;

- God  $J + J+1$  : il s'agit de la somme à Goderville des pluies  $J$  et  $J-1$ . Cela permet de voir, au cas où celle-ci est inférieure à 15 mm, qu'il ne peut y avoir de pluie génératrice supérieure à ce seuil ;
- Cond 2 : Il s'agit de la condition « pluie génératrice > 15 mm ». Celle-ci est remplie quand  $P(J) > 15$  mm ou  $P(J-1) > 15$  mm. Elle est infirmée quand  $P(J) + P(J-1) < 15$  mm (voir ci-dessus). Enfin, quand  $P(J) < 15$  mm et  $P(j-1) < 15$  mm, mais que  $P(j) + P(j-1) > 15$  mm, elle est « indécidable ». On reporte alors un point d'interrogation ;
- Cond 1 et 2 : vrai si les conditions 1 et 2 sont satisfaites simultanément. Indécidable si Cond 2 l'est, fausse si Cond 1 ou Cond 2 sont fausses.

#### Commentaires :

- *Analyse des « non » et des « ? »* : un seul événement est noté « n » pour la condition 2. Il s'agit d'un événement noté oui pour la condition 1 (le 28/12/93). Neuf dates sont notées « ? ». Pour sept d'entre elles, il s'agissait déjà de dates ne satisfaisant pas la condition 1. Les deux autres dates sont le 30/12/93 et le 30/10/98. A noter cependant que pour ces deux dates des pluies locales plus fortes qu'à Goderville et dépassant 15 mm sont observées. Au final, si l'on observe la proportion d'événements obéissant à la fois aux conditions 1 et 2, on obtient 11 « n », 2 « ? » et 29 « o ».
- Par construction, ce score est légèrement plus faible que celui ne contenant que la condition 1. Néanmoins, ici on obtient une description plus riche, puisque, c'est chaque date qui est ainsi analysée, et pas seulement la correspondance avec une période de pluie.
- On aurait pu espérer en revanche que l'introduction de cette condition Cond 2 puisse diminuer le nombre de fausses alertes. Or, on a vu dans le Tableau 33 que 4 des périodes concernées présentent des journées à plus de 15 mm. Pour les 2 autres, on trouve au moins une fois une somme de 2 jours consécutifs à plus de 15 mm. Au mieux, pourrait-on considérer ces 2 périodes comme indécidables.
- D'ailleurs, il serait relativement peu probable que dans une période de pluie de plus de 80 mm en 10 jours, il n'y ait jamais de cas présentant 2 jours consécutifs à plus de 15 mm.
- On voit que Goderville est en moyenne le poste le plus arrosé. Néanmoins, ponctuellement, tel ou tel poste présente des valeurs supérieures à  $J$  (20 fois sur 42) et à  $J-1$  (18 sur 42 cas). Ainsi, les cas de condition 2 seraient plus fréquemment réalisés si l'on prenait en compte ces postes.

L'applicabilité intégrale des conditions de type INRA, avec le calcul d'une pluie « initiale » et d'une pluie génératrice est donc délicate, quand on ne dispose que de données pluviométriques au pas de temps quotidien.

C'est pourquoi dans le paragraphe suivant on s'attachera à analyser les données de l'AREAS, qui permettent une description à pas de temps fin de la pluie et du ruissellement.

## 7. Détermination de la pluie génératrice à partir de la base de données AREAS sur les bassins versants expérimentaux

L'enregistrement en continu du ruissellement et de la pluie sur les trois stations de mesures en vallées sèches est une source d'information qui peut permettre une analyse locale plus fine que celle effectuée sur l'ensemble du département. Sur la période d'enregistrement, plusieurs événements hydrologiques majeurs ont ainsi pu être quantifiés précisément, dont quelques uns très importants comme ceux de janvier 1995 et de Noël 1999.

L'ensemble des données disponibles permet de valider et de préciser les résultats obtenus aux chapitres précédents.

### 7.1. Informations utilisées

Nous avons décrit précédemment<sup>6</sup> l'information dont nous disposons et de quelle manière elle se présente. Rappelons que la pluie génératrice d'un ruissellement n'est pas connue de façon automatique, mais nécessite l'intervention de l'opérateur. Cette opération étant relativement longue, elle n'a pu être faite sur l'ensemble de tous les couples (ruissellement ; pluie) disponibles, mais sur une sélection de ceux-ci.

Au total, 127 couples de données ont ainsi été renseignés (elles sont détaillées en annexe). Cette sélection comporte trois ensembles de points :

- tous les ruissellements élémentaires de  $LR_{pr} \geq 1 \text{ mm}$  ;
- tous les événements présents dans la base de données générale des événements ;
- pour la seule station de Bourville, nous avons également renseigné la pluie génératrice de tous les événements ruisselants survenus lorsque le cumul de pluie sur 10 jours était supérieur à 50 mm, ou que la pluie du jour était importante.

Pour ce dernier site, cela fait un total de 91 ruissellements élémentaires renseignés entre janvier 1995 et décembre 2000. Sur la période étudiée (Tableau 14 page 43), nous disposons de 11 ruissellements élémentaires de  $LR_{pr} \geq 3 \text{ mm}$ , dont 8 enregistrés à Bourville. C'est important, mais insuffisant du point de vue statistique. Cependant, comme on le vérifiera, la grande cohérence des enregistrements permet de faire ressortir une caractérisation nette des événements hydrologiques majeurs.

Pour caractériser les ruissellements enregistrés sur les stations de mesures, nous avons utilisé les critères suivants :

- $LR_{pr}$ , la lame ruisselée par les surfaces potentiellement ruisselantes, pour quantifier le caractère catastrophique de l'événement (la date du début du ruissellement définit le jour  $j$ ) ;
- $P_{evr}$ , la pluie génératrice de l'événement ruisselant considéré ;
- $\sum_{[j-9;evr[} P$ , le cumul des pluies depuis le début du jour  $j-9$  jusqu'à la pluie génératrice de l'événement ruisselant exclu ;
- $\sum_{[j-1;evr[} P$ , le cumul des pluies depuis le début du jour  $j-1$  jusqu'à la pluie génératrice de l'événement ruisselant exclu.

---

<sup>6</sup>chapitre *Recensement des données disponibles* page 17 et suivantes

## 7.2. Définition du caractère majeur d'un événement dans ce contexte

Nous avons défini un seuil sur la lame ruisselée par les surfaces potentiellement ruisselantes  $LR_{pr}$  pour distinguer les *événements hydrologiques majeurs* des autres événements<sup>7</sup>.

Rappelons que les lames ruisselées ne sont qu'un descripteur objectif du ruissellement, sans lien direct avec les dégâts qu'il peut causer : la gravité des dégâts dépend de la présence d'enjeux sur le trajet du ruissellement, et de la configuration des lieux qui les rendront plus ou moins vulnérables. En considérant les ruissellements sous leur dimension *lame ruisselée*, nous nous intéressons à *l'aléa*, et pas à la *vulnérabilité*.

Dans la synthèse générale des informations ayant conduit à la qualification des événements hydrologiques graves, nous avons retenu un seuil *a priori* de 1 mm. Dans ce cadre, cette source d'information n'est qu'une parmi les autres, aucune n'étant suffisante à elle seule pour qualifier un événement.

En revanche, ici, nous ne nous intéressons qu'à ce qui s'est passé localement sur les bassins versants équipés. La seule donnée  $LR_{pr}$  est donc suffisante pour quantifier la gravité de l'événement à l'échelle des bassins versants considérés.

Cependant, l'analyse conduisant à décrire des fréquences de retour sur les débits instantanés de nos sites de mesure n'a pas encore été faite. Mais, si dans une zone très vulnérable, un ruissellement de 0,5 mm peut être *significatif* et causer des dégâts si la vulnérabilité est particulièrement forte, l'expérience montre qu'un ruissellement devient *important* à partir de 2 ou 3 mm, et qu'un ruissellement de 4,5 ou 5 mm est *plus rare*.

Pour définir précisément le seuil à retenir, nous avons comparé le classement des événements hydrologiques issu de la base de données des événements avec la lame ruisselée mesurée, répartie en cinq classes :

- $LR_{pr} < 1 \text{ mm}$ , ruissellements non significatifs,
  - $1 \text{ mm} \leq LR_{pr} < 2 \text{ mm}$
  - $2 \text{ mm} \leq LR_{pr} < 3 \text{ mm}$
  - $3 \text{ mm} \leq LR_{pr} < 5 \text{ mm}$
  - $LR_{pr} \geq 5 \text{ mm}$ , ruissellements très importants.
- } ces trois catégories permettant de lire le seuil à retenir,

Pour conclure, nous avons surtout tenu compte des résultats obtenus pour le site de Bourville, visibles sur la Figure 26 ci-dessous. D'une part, c'est le seul site à être représentatif des phénomènes étudiés à plus petite échelle, et d'autre part, il est le seul des trois sites à disposer des enregistrements de tous les événements hydrologiques hivernaux les plus importants. Les résultats de Blossenville et du Hanouard n'infirment pas ceux de Bourville.

---

<sup>7</sup> sur le choix de la lame ruisselée comme descripteur d'un ruissellement, voir le chapitre *Exploitation des données* page 39

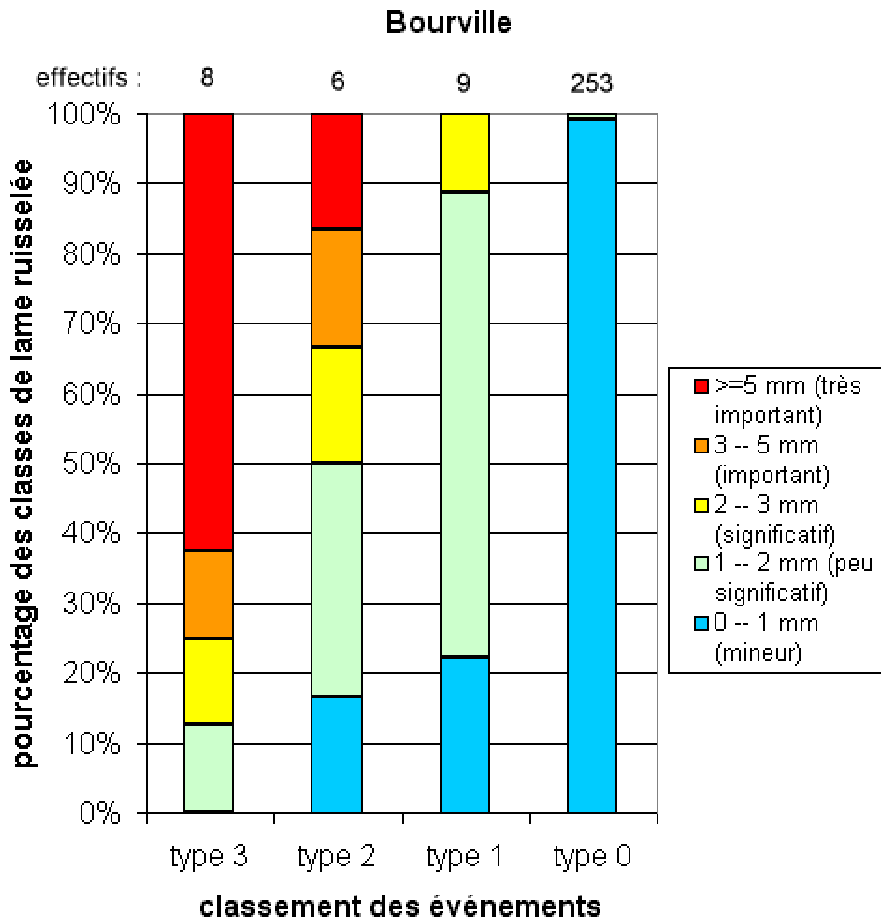


Figure 26 : répartition des classes de lame ruisselée sur le bassin versant de Bourville selon le classement des événements à l'échelle de la zone d'étude, sur la période janvier 1995 – décembre 2000.

Naturellement, la corrélation entre classement d'un événement à l'échelle de la zone d'étude et la classe de lame ruisselée sur les bassins versants expérimentaux, représentative d'une échelle beaucoup plus grande, n'est pas parfaite. Ceci est dû à la variabilité spatiale des phénomènes dans leur étendue et leur intensité, ainsi qu'au fait que le classement des événements intègre la vulnérabilité, quand la lame ruisselée ne mesure que l'aléa. Cependant, les résultats sont cohérents. On note que parmi les événements classés 1 ou 0, aucun ruissellement ne présente une lame ruisselée supérieure à 3 mm (sur les surfaces potentiellement ruisselantes).

**Nous retiendrons, pour l'analyse de nos données, le seuil de 3 mm pour définir l'ensemble des événements qu'il serait souhaitable d'anticiper, et que nous devons parvenir à caractériser.**

### 7.3. Influence de la pluie de la veille

Les résultats antérieurs ont montré l'importance du cumul des pluies avant la pluie génératrice du ruissellement. Nous avons examiné si, dans ce cumul, les pluies tombées juste avant la pluie génératrice avaient une importance particulière.

Pour cela, nous avons représenté la lame ruisselée  $LR_{pr}$  en fonction de la pluie génératrice et de  $\sum_{[j-1;evr[} P$ , la pluie tombée entre le début du jour  $j-1$  et le début de la pluie génératrice.

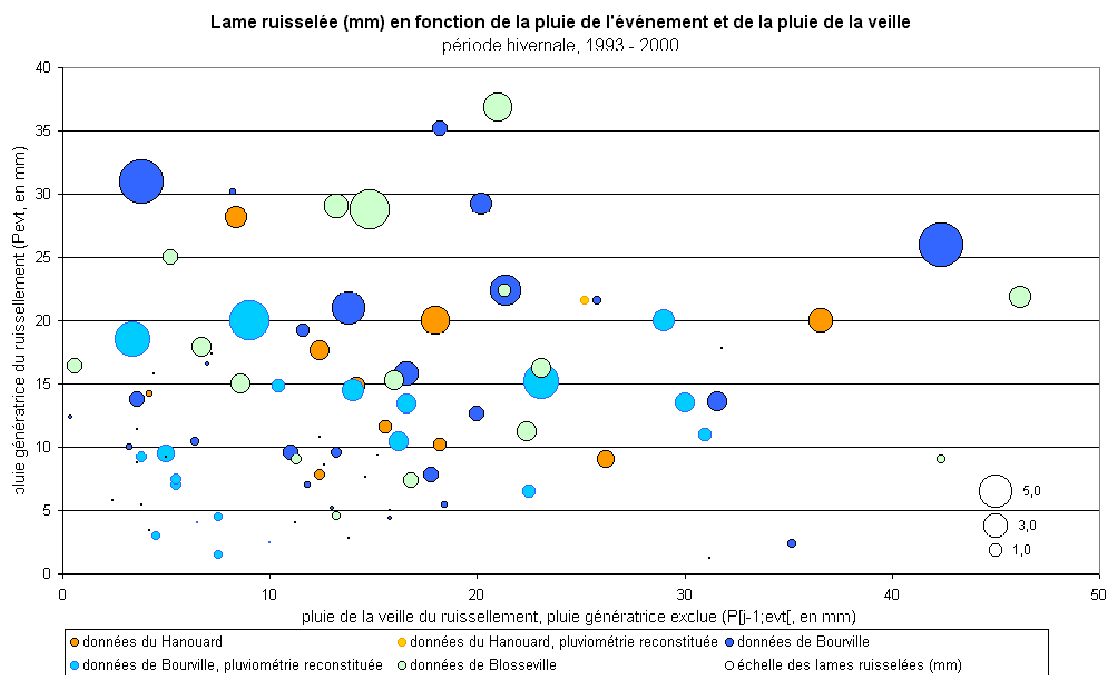


Figure 27 : lame ruisselée en fonction de la pluie génératrice et de la pluie du début du jour j-1 jusqu'au début de la pluie génératrice, tous les points disponibles sur les périodes hivernales entre janvier 1993 et décembre 2000

A la lecture de cette figure, il est manifeste que les valeurs de lame ruisselée sont indépendantes de la pluie survenant juste avant la pluie génératrice du ruissellement. On en conclut :

**Dans le cumul de pluie sur les dix jours précédant un événement ruisselant, la pluie survenant juste avant la pluie génératrice n'a pas d'influence particulière sur la hauteur de la lame ruisselée.**

#### 7.4. Analyse des événements hydrologiques majeurs

Pour les trois sites de mesures en vallée sèche, tous les triplets de valeur  $\left( \sum_{[j-9;evt[} P, P_{evt}, LR_{pr} \right)$  disponibles sur les périodes hivernales entre janvier 1993 et décembre 2000 sont reportés sur la Figure 28.

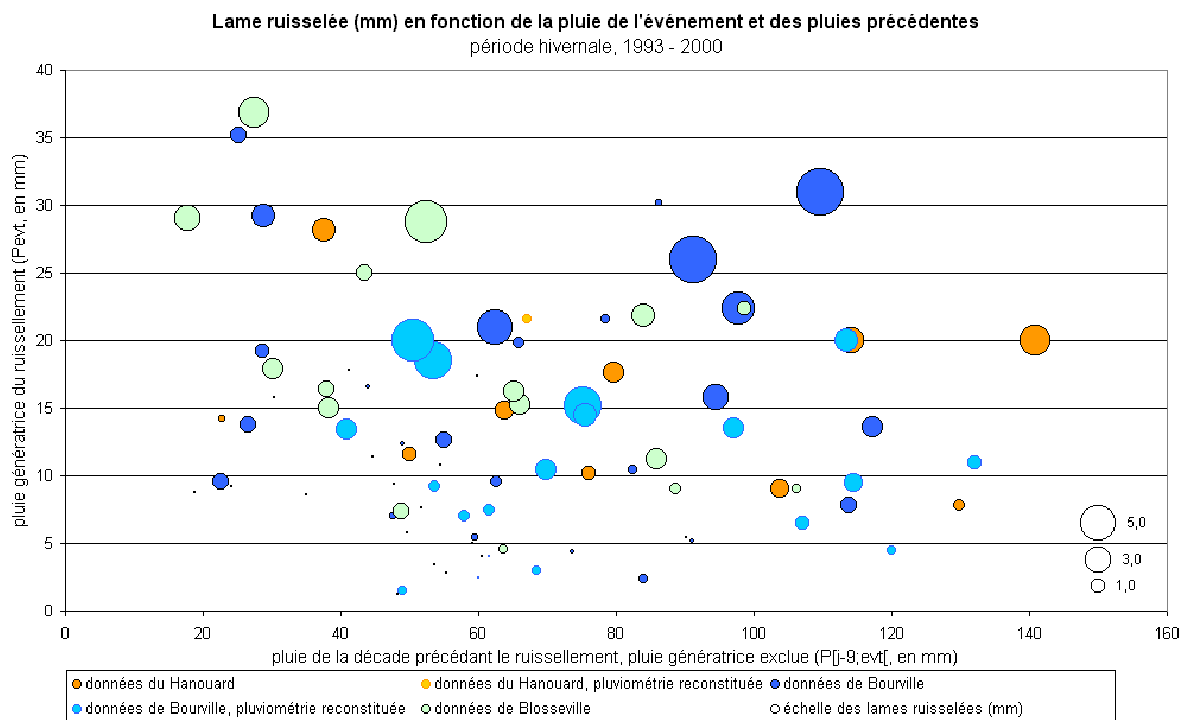


Figure 28 : lame ruisselée en fonction de la pluie génératrice et de la pluie de la décade précédente, tous les points disponibles sur les périodes hivernales entre janvier 1993 et décembre 2000

### 7.4.1. Définition des conditions d'apparition des événements majeurs

Lorsque l'on extrait de la figure précédente l'ensemble des événements de lame ruisselée supérieure à 3 mm (événements majeurs), on obtient la Figure 29 ci-après. Cette dernière est plus facilement lisible pour identifier les caractères communs à tous ces ruissellements.

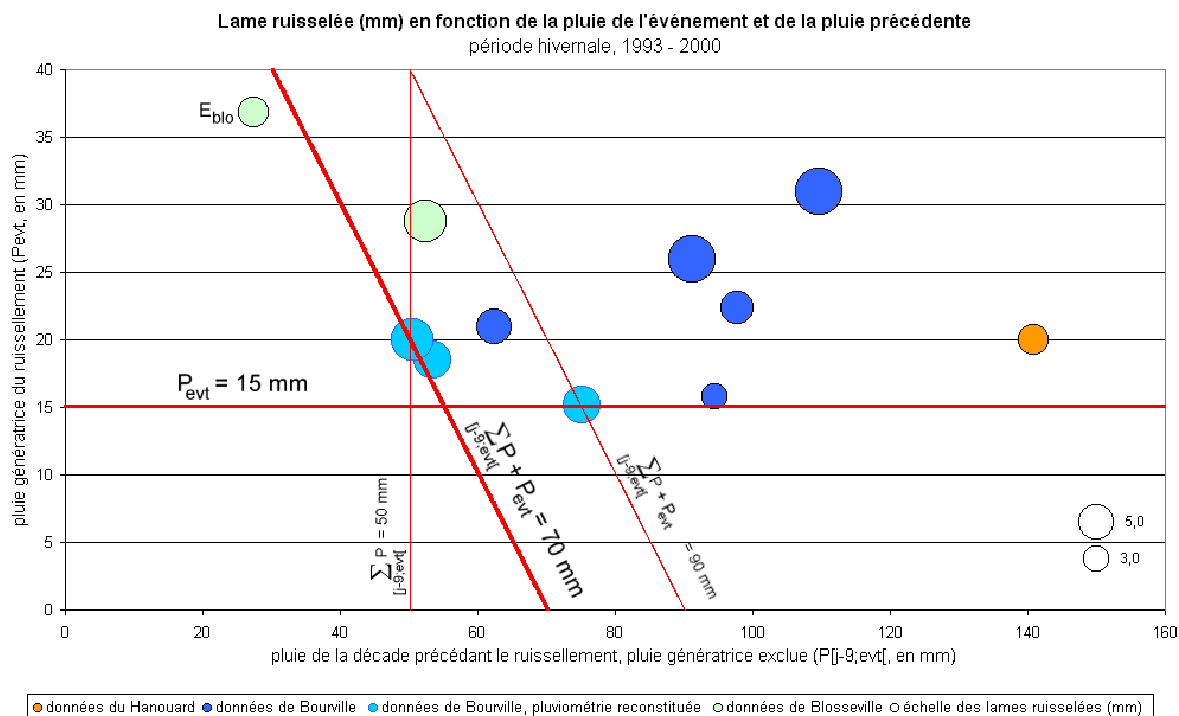


Figure 29 : lame ruisselée en fonction de la pluie génératrice et de la pluie de la décade précédente, ruissellements majeurs ( $LR_{pr} \geq 3$  mm) sur les périodes hivernales entre janvier 1993 et décembre 2000

Sur cette figure, un seuil apparaît concernant  $P_{evt}$  : tous les ruissellements majeurs sont survenus avec une pluie génératrice de l'événement ruisselant supérieure à 15 mm. Ce seuil est robuste : en dessous de  $P_{evt} = 15 \text{ mm}$ , aucun ruissellement sur les surfaces potentiellement ruisselantes ne dépasse 2,2 mm.

Dans un premier temps, nous avons adapté localement les résultats précédemment obtenus. Ces résultats concluaient sur l'existence d'un seuil sur le cumul de pluie sur la décade précédant l'événement. PAPY et DOUYER avaient conclu sur un seuil de 90 mm pour le cumul  $\sum_{[j-9;j]} P$ . Au chapitre 7 de cette étude, en nous appuyant sur le poste de Goderville, nous avons montré que ce seuil est de 80 mm.

Grâce à la précision de nos données, nous avons adapté ces seuils en substituant les  $\sum_{[j-9;j]} P$  par des  $\sum_{[j-9;evt]} P$ , puisque nous connaissons précisément le début et la fin des pluies génératrices<sup>8</sup>. Ces seuils ont été ajoutés sur la figure.

On voit que ni le seuil  $\sum_{[j-9;evt]} P + P_{evt} = 90 \text{ mm}$ , ni le seuil  $\sum_{[j-9;evt]} P + P_{evt} = 80 \text{ mm}$  (non représenté) ne conviennent : quatre événements de lame ruisselée sur les surfaces potentiellement ruisselantes supérieure à 5 mm se sont produits alors que  $\sum_{[j-9;evt]} P + P_{evt}$  était compris entre 70 et 90 mm, et un événement (noté  $E_{blo}$  sur la figure) présente même un cumul  $\sum_{[j-9;evt]} P + P_{evt}$  légèrement inférieur à 70 mm.

### Il est donc nécessaire de baisser ce seuil.

Cette adaptation à la baisse n'est pas très étonnante :

- d'abord, en précisant quelle était la pluie génératrice, nous nous affranchissons quasi complètement du problème de la discrétisation de la pluie sur un pas de temps de 24 heures ;
- ensuite les bassins versants sur lesquels nous travaillons sont de petite taille, leurs réponses sont donc rapides ;
- d'autre part, depuis la parution des premiers résultats dans les années 80, l'occupation du sol a évolué : les surfaces en prairies ont reculé au profit des terres labourées (et des surfaces construites), rendant les bassins versants plus sensibles au ruissellement ;
- enfin, ce sont des données de pluies locales qui sont utilisées, situées plus bas sur le gradient pluviométrique moyen entre la côte et le centre du plateau que les postes utilisés précédemment par Papy et Douyer.

L'événement le plus à gauche de la figure est le point noté  $E_{blo}$ , survenu à Blosseville le 13 avril 2000. Sa lame ruisselée sur les surfaces potentiellement ruisselantes est de 3,96 mm et le cumul de pluie de la décade jusqu'à la pluie génératrice incluse est de 64,2 mm. Baisser le seuil sur le cumul  $\sum_{[j-9;evt]} P + P_{evt}$  à 64 mm permettrait donc de caractériser tous les événements mesurés. Mais une analyse détaillée de cet événement montre que les conditions agro-pédologiques de cette date en font un cas particulier. Ce 13 avril 2000, un ruissellement a aussi été enregistré à Bourville, avec une lame ruisselée sur les surfaces potentiellement ruisselantes nettement inférieure à 3 mm. Ce cas particulier est présenté en détail en annexe. Il y est montré que si la lame ruisselée de 3,96 mm enregistrée à Blosseville est nettement

<sup>8</sup> rappelons qu'avec nos notations, définies page 72, on a  $\sum_{[j-9;evt]} P = \sum_{[j-9;evt]} P + P_{evt}$

supérieure à celle de Bourville (1,18 mm) pour une pluie identique, c'est à cause d'une configuration spatiale particulière des cultures sur le petit bassin versant de Blosseville cette année-là.

Le point noté  $E_{blo}$  est donc un cas limite. Dans ces conditions, la valeur de 70 mm pour le seuil sur le cumul  $\sum_{[j-9;evt[} P + P_{evt}$  est convenable.

Cependant, en éliminant le point  $E_{blo}$  du pool des ruissellements majeurs à caractériser, on est tenté d'utiliser un autre critère, impliquant le seul cumul des pluies de la décade hors pluie génératrice  $\sum_{[j-9;evt[} P$ . Le critère  $\sum_{[j-9;evt[} P \geq 50 \text{ mm}$  permet bien de caractériser tous les ruissellements majeurs hors mis  $E_{blo}$ . Nous manquons de valeurs expérimentales pour discerner avec certitude lequel de ces deux critères est le plus pertinent. La proximité du point  $E_{blo}$  avec le seuil  $\sum_{[j-9;evt[} P + P_{evt} = 70 \text{ mm}$  plaide néanmoins en faveur du critère

$$\sum_{[j-9;evt[} P + P_{evt} \geq 70 \text{ mm} .$$

Nous avons donné plus haut les raisons qui justifient un abaissement du seuil de 80 mm précédemment trouvé. Compte-tenu de celles-ci, passer de  $\sum_{[j-9;j] P = 80 \text{ mm}$  à

$\sum_{[j-9;evt[} P + P_{evt} = 70 \text{ mm}$  est une correction très légère. Les résultats obtenus grâce aux mesures des sites expérimentaux de l'AREAS sont donc parfaitement cohérents avec les résultats obtenus sur l'ensemble de la zone d'étude.

**La genèse de lame ruisselée sur les surfaces potentiellement ruisselantes supérieure à 3 mm ont eu lieu dans les conditions suivantes :**

$$\begin{cases} \sum_{[j-9;evt[} P + P_{evt} \geq 70 \text{ mm} \\ P_{evt} \geq 15 \text{ mm} \end{cases}$$

On remarque aussi qu'il n'y a pas de lien entre le cumul de pluie sur la décade et la lame ruisselée, dès lors que le seuil sur la décade est dépassé.

Enfin les événements enregistrés le 13 avril 2000 ont montré combien **la taille des bassins versants peut avoir une influence sur la lame ruisselée**. Cela se traduit par une variabilité annuelle plus forte lorsque le nombre de parcelles décroît. Cela prouve aussi que **les seuils peuvent évoluer dans le temps en fonction de l'aménagement du territoire**.

#### **7.4.2. Analyse des événements non majeurs remplissant les conditions de déclenchement**

Si les conditions ci-dessus décrivent bien les ruissellements majeurs, des ruissellements de lame ruisselée inférieure à 3 mm remplissent aussi ces conditions, comme on le voit sur la zone orangée de la figure suivante. Le Tableau 36 liste tous les ruissellements présents dans cette zone.

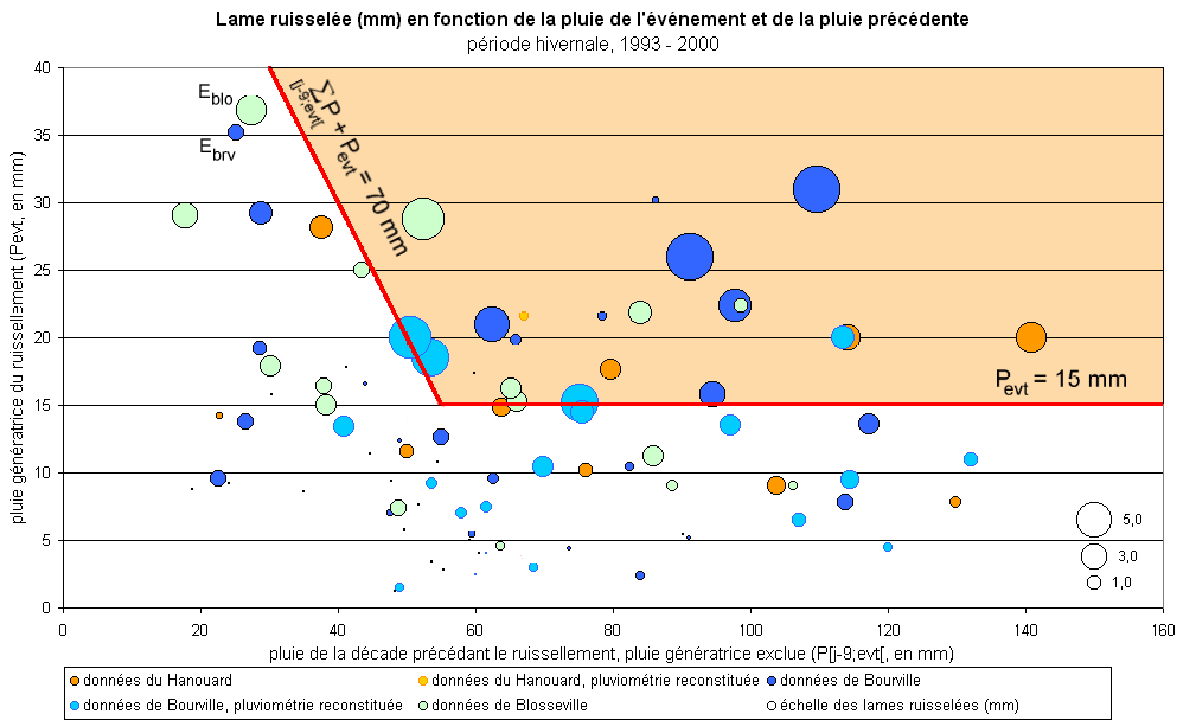


Figure 30 : lame ruisselée en fonction de la pluie génératrice et de la pluie de la décade précédente, tous les points disponibles sur les périodes hivernales entre janvier 1993 et décembre 2000, la zone des conditions  $\sum_{[j-9;evt]} P + P_{evt} \geq 70 \text{ mm}$  et  $P_{evt} \geq 15 \text{ mm}$  est représentée en orangé.

| site                | $\sum_{[j-9;evt]} P$ | $P_{evt}$   | $LR_{pr}$   | date                  |
|---------------------|----------------------|-------------|-------------|-----------------------|
| le Hanouard         | 63,8                 | 14,8        | 1,65        | 29/12/1994            |
| le Hanouard         | 79,6                 | 17,6        | 1,79        | 24/01/1995            |
| le Hanouard         | 114,2                | 20,0        | 2,80        | 26/01/1995            |
| <b>le Hanouard</b>  | <b>140,8</b>         | <b>20,0</b> | <b>4,07</b> | <b>29/01/1995</b>     |
| <i>le Hanouard*</i> | <i>67,0</i>          | <i>21,6</i> | <i>0,52</i> | <i>10/10/2000</i>     |
| <b>Blosseville</b>  | <b>52,4</b>          | <b>28,8</b> | <b>6,84</b> | <b>14/10/1993</b>     |
| <i>Blosseville</i>  | <i>84,0</i>          | <i>21,8</i> | <i>2,32</i> | <i>26/10/1994</i>     |
| Blosseville         | 66,1                 | 15,3        | 1,91        | 24/01/1995            |
| Blosseville         | 65,1                 | 16,2        | 1,81        | 26/01/1995            |
| Blosseville         | 98,7                 | 22,4        | 0,93        | 27/01/1995            |
| <b>Bourville*</b>   | <b>53,5</b>          | <b>18,5</b> | <b>5,51</b> | <b>24/01/1995</b>     |
| <b>Bourville*</b>   | <b>75,1</b>          | <b>15,2</b> | <b>5,42</b> | <b>26/01/1995</b>     |
| <i>Bourville</i>    | <i>59,8</i>          | <i>17,4</i> | <i>0,05</i> | <i>11/10/1997 12h</i> |
| <i>Bourville</i>    | <i>78,4</i>          | <i>21,6</i> | <i>0,44</i> | <i>11/10/1997 21h</i> |
| <b>Bourville</b>    | <b>94,4</b>          | <b>15,8</b> | <b>3,01</b> | <b>30/10/1998</b>     |
| <b>Bourville</b>    | <b>109,6</b>         | <b>31,0</b> | <b>8,91</b> | <b>31/10/1998</b>     |
| <i>Bourville</i>    | <i>86,2</i>          | <i>30,2</i> | <i>0,22</i> | <i>03/10/1999</i>     |
| Bourville           | 65,8                 | 19,8        | 0,63        | 13/12/1999            |
| <b>Bourville</b>    | <b>97,8</b>          | <b>22,4</b> | <b>4,71</b> | <b>18/12/1999</b>     |
| <b>Bourville</b>    | <b>62,4</b>          | <b>21,0</b> | <b>5,33</b> | <b>24/12/1999</b>     |
| <b>Bourville</b>    | <b>91,2</b>          | <b>26,0</b> | <b>8,72</b> | <b>26/12/1999</b>     |
| Bourville*          | 75,5                 | 14,5        | 2,14        | 05/11/2000            |
| Bourville*          | 113,5                | 20,0        | 2,45        | 08/11/2000            |
| <b>Bourville*</b>   | <b>50,5</b>          | <b>20,0</b> | <b>7,52</b> | <b>20/11/2000</b>     |

Tableau 36 : événements ruisselants remplissant les conditions des ruissellements majeurs (une astérisque marque les événements dont la pluviométrie est reconstituée, les événements de lame ruisselée supérieure à 3 mm sont en gras, ceux survenus en octobre sont en italique)

Une première lecture de ce tableau montre que parmi les ruissellements remplissant les conditions  $\sum_{[j-9;evt]} P + P_{evt} \geq 70 \text{ mm}$  et  $P_{evt} \geq 15 \text{ mm}$ , ceux dont la lame ruisselée est inférieure à 3 mm (soit l'ensemble des « fausses alertes ») représentent 14 cas sur 24, soit plus de la moitié.

Parmi ces 14 cas, 5 se sont produits au mois d'octobre, c'est-à-dire au début de la période de l'année à laquelle notre étude est consacrée. L'analyse des états de surface des sols cultivés à cette période peut apporter un élément d'explication aux plus faibles ruissellements.

Le mois d'octobre est une période où les sols cultivés sont intensément travaillés : au moins la moitié des surfaces est labourée et semée avec les cultures d'hiver<sup>9</sup>. L'autre moitié des sols, pour l'essentiel, est déchaumée ou semée avec une culture intermédiaire. Sur ces sols fraîchement travaillés, la rugosité de la surface reste encore élevée, permettant une rétention sous forme de flaques de 3 à 6 mm (BOIFFIN *et al.*, 1988, et PAPY et BOIFFIN, 1988).

A partir de cet état initial (Tableau 37), la rugosité ne diminuera que progressivement sous l'impact des 150 premiers millimètres de pluie, parallèlement au développement de la croûte de battance qui fait diminuer l'infiltrabilité du sol. La détention superficielle aura alors

<sup>9</sup> blé, escourgeon, colza

diminué environ de moitié. Après 350 mm de précipitations, la rugosité sera quasi nulle et l'infiltrabilité sera inférieure à  $2 \text{ mm.h}^{-1}$ .

| classe de rugosité | écart-type des cotes de surface (cm) | détention superficielle (mm) | exemple typique de situation correspondante                               | quantité de pluie nécessaire pour faire passer la rugosité à la classe inférieure (sol nu sans résidu) |
|--------------------|--------------------------------------|------------------------------|---|--|
| 4                  | > 3                                  | > 6                          | labours récents ; déchaumages récents à résidus abondants                 | 100  |
| 3                  | 2,0 – 3,0                            | 3 – 6                        | semis récents à structure motteuse intacte ; sols travaillés sans résidus | 150  |
| 2                  | 1,2 – 2,0                            | 1,5 – 3                      | semis légèrement battus   | 200  |
| 1                  | 0 – 1,2                              | 0 – 1,5                      | semis très battus ou chantiers de récolte très compactés                  |  |

Tableau 37: estimation de l'évolution des classes de rugosité en fonction des pluies cumulées (d'après BOIFFIN, 1984)

Un cumul de 150 mm de précipitations après les travaux agricoles d'octobre est généralement atteint avant la fin du mois de novembre, et la classe de rugosité 1 est généralisée sur tous les semis d'hiver avant la fin décembre lors d'une année moyenne. Ainsi, toutes choses égales par ailleurs, une pluie ruissellera moins si elle se produit peu après les travaux agricoles. La période, généralement limitée au mois d'octobre, durant laquelle une forte proportion des terres cultivées présente une rugosité forte (classes 3 et 2) constitue donc une période de transition au cours de laquelle la croûte de battance est développée mais la plus forte rugosité superficielle retient encore 1 à 3 mm d'excès d'eau qui sont soustraits au ruissellement. Dans ces conditions, les lames ruisselées restent en dessous du seuil de 3 mm.

Pour les mêmes raisons, les mois de mars et d'avril sont à la limite de l'applicabilité des résultats de cette étude : au cours de cette période et selon les années, environ la moitié des terres labourées peut être retravaillée pour implanter les cultures de printemps. En outre, la végétation commence à davantage protéger le sol.

Les ruissellements mesurés à Bourville les 5 et 8 novembre 2000 peuvent être ramenés à cette période de transition : le mois d'octobre 2000 ayant été particulièrement pluvieux (193 mm à Luneray), les travaux agricoles ont été retardés, et les états de surface de ce début novembre étaient ceux observés d'ordinaire lors de la seconde quinzaine d'octobre.

Pour bien analyser les 7 autres cas dont la lame ruisselée est inférieure à 3 mm et étant survenus hors période de transition (nous dirions les sept autres « fausses alertes », si nous étions dans un contexte prédictif), comme pour le cas du 13 avril 2000 (seul « cas non prévu »), il est nécessaire de tenir compte des particularités de chaque site de mesure. Ceci est fait en annexe.

### 7.4.3. Bilan

Nous avons vu que si les sites de Blosseville et du Hanouard nous donnent des informations utiles, les plus pertinentes sont néanmoins celles fournies par le site de Bourville. Reprenons pour ce dernier l'ensemble des événements de lame ruisselée supérieure à 3 mm *ou* remplissant les conditions  $\sum_{[j-9;evi]} P \geq 70 \text{ mm}$  et  $P_{evi} \geq 15 \text{ mm}$ , et précisons l'analyse de chacun de ces événements. Ceci est fait dans le Tableau 38. On y voit que :

- tous les événements majeurs ( $LR_{pr} \geq 3 \text{ mm}$ ) sont caractérisés par le couple de conditions que nous avons donné ;

- les événements correspondant à des fausses alertes sans explication apparente se limitent à un seul événement, celui du 13 décembre 1999.

| $\sum_{[j-9;evt]} P$ | $P_{evt}$ | $LR_{pr}$ | événements majeurs ( $LR_{pr} \geq 3 \text{ mm}$ ) hors conditions | dates                                     |   |                  |
|----------------------|-----------|-----------|--|---|---|------------------|
|                      |           |           |  | événements remplissant les conditions     |   |                  |
|                      |           |           |  | événements de $LR_{pr} \geq 3 \text{ mm}$ | événements de $LR_{pr} < 3 \text{ mm}$            |                  |
|                      |           |           |  |   | période de transition (juste après travaux agri.) | sans explication |
| 53,5                 | 18,5*     | 5,51      |  | 24/01/1995                                |   |                  |
| 75,1                 | 15,2*     | 5,42      |  | 26/01/1995                                |   |                  |
| 59,8                 | 17,4      | 0,05      |  |   | 11/10/1997 12h                                    |                  |
| 78,4                 | 21,6      | 0,44      |  |   | 11/10/1997 21h                                    |                  |
| 94,4                 | 15,8      | 3,01      |  | 30/10/1998                                |   |                  |
| 109,6                | 31,0      | 8,91      |  | 31/10/1998                                |   |                  |
| 86,2                 | 30,2      | 0,22      |  |   | 03/10/1999  |                  |
| 65,8                 | 19,8      | 0,63      |  |   |   | 13/12/1999       |
| 97,8                 | 22,4      | 4,71      |  | 18/12/1999                                |   |                  |
| 62,4                 | 21,0      | 5,33      |  | 24/12/1999                                |   |                  |
| 91,2                 | 26,0      | 8,72      |  | 26/12/1999                                |   |                  |
| 75,5                 | 14,5*     | 2,14      |  |   | 05/11/2000  |                  |
| 113,5                | 20,0*     | 2,45      |  |   | 08/11/2000  |                  |
| 50,5                 | 20,0*     | 7,52      |  | 20/11/2000                                |   |                  |

Tableau 38 : événements ruisselants enregistrés à Bourville remplissant les conditions des ruissellements majeurs  $\sum_{[j-9;evt]} P + P_{evt} \geq 70 \text{ mm}$  et  $P_{evt} \geq 15 \text{ mm}$  ou ayant une lame ruisselée supérieure à 3 mm (une astérisque marque les événements dont la pluviométrie est reconstituée)

En conclusion, en début de période automnale, l'état de surface du sol en cours d'évolution a un effet dont il faudra tenir compte pour améliorer les prévisions des fortes lames ruisselées.

## 7.5. Synthèse

Lorsque la rugosité est faible sur l'ensemble des terres labourées, c'est-à-dire en moyenne de début novembre à début mars, et pour des bassins versants de plusieurs kilomètres carrés, les hauteurs de lame ruisselée par les surfaces potentiellement ruisselantes supérieures à 3 mm surviennent dans les conditions suivantes :

- {
   
 une pluie de la décade précédant l'événement, pluie génératrice du ruissellement comprise, d'au moins 70 mm,
   
 et
   
 une pluie génératrice de l'événement ruisselant d'au moins 15 mm.

Cependant, selon les années, ce résultat peut être valable dès le début du mois d'octobre ou jusqu'au mois d'avril.

Pour les événements survenant dans ces conditions,

- la pluie tombant juste avant la pluie génératrice n'a pas d'influence particulière,
- et il n'y a pas de lien entre la lame ruisselée et la pluie de la décade.

## 8. Discussion sur la faisabilité d'une anticipation des désordres hydrologiques hivernaux

Définir la faisabilité d'une telle anticipation revient à recenser l'ensemble des moyens à mettre en œuvre pour qu'un système fonctionnant en temps réel puisse voir le jour. C'est ce que nous nous proposons d'étudier dans ce chapitre.

L'observation et la prévision des précipitations sur les points de référence est un préalable indispensable. C'est pourquoi nous reviendrons plus en détail sur la façon dont de telles informations peuvent être obtenues, en décrivant d'abord le besoin de façon précise, puis en recensant les possibilités actuelles et futures de les mettre en œuvre dans le contexte de la zone d'étude choisie.

### 8.1. Les besoins en données météorologiques

L'étude a pu se conclure sur le constat qu'un cumul de 80 mm en 10 jours sur le point de référence, incluant une pluie *récente ou en cours* d'au moins 15 mm, réunissait sur la période d'octobre à mars les meilleures conditions nécessaires et suffisantes pour que des désordres hydrologiques se produisent. Les résultats statistiques montrent en effet d'une part une proportion de près de 75% de bonnes prévisions, et un nombre de fausses alertes relativement limité (5 périodes en 9 ans, n'excédant pas quelques jours).

Sur le plan opérationnel, il convient de prendre en compte la pluie en cours, voire la pluie à venir, si l'on veut disposer de cette même anticipation. Ainsi, il sera utile de disposer d'un ensemble de 3 types d'informations :

- l'observation de la pluie tombée depuis 10 jours ;
- l'estimation de la pluie en cours ;
- l'estimation des pluies futures.

Or, les méthodes et moyens d'obtention de ces informations en temps réel diffèrent assez largement, et leur synthèse peut se révéler délicate. C'est pourquoi nous allons maintenant passer en revue les diverses possibilités qui s'offrent à nous.

### 8.2. L'observation des précipitations

Le moyen privilégié d'observation des précipitations reste le pluviomètre, de principe extrêmement simple, puisqu'il s'agit d'un simple récipient de surface connue, que l'on dispose horizontalement pour recueillir la pluie.

Son premier inconvénient est de nécessiter des manipulations à chaque observation. C'est pourquoi, très rapidement, des procédures d'automatisation de la mesure ont été proposées, pour le transformer en « pluviographe ». La technologie actuellement la plus répandue demeure l'auge basculant, même si d'autres technologies sont en train d'émerger (pesée, conductivité, etc...).

Un second inconvénient du pluviomètre est sa faible représentativité spatiale : si l'on veut échantillonner avec précision des champs de pluie irréguliers (cas des orages, par exemple), il devient nécessaire de disposer un nombre important de postes, ce qui augmente le coût du dispositif.

Pour pallier cet inconvénient, l'utilisation du radar pour la mesure de pluie a alors été envisagée. En effet, le radar permet de réaliser des cartographies des précipitations dans un

rayon d'environ 100 km, à des intervalles de quelques minutes seulement. Néanmoins, la perception des précipitations par radar est indirecte, et leur estimation quantitative nécessite des conditions d'exploitation favorables et des traitements élaborés.

Sur notre zone d'étude, la situation n'est guère favorable. Si l'on dispose d'un réseau de postes pluviométriques suffisant pour des analyses *a posteriori* (que nous avons pu utiliser pour notre étude), la possibilité d'obtenir des informations diffusées en temps réel est quasi-inexistante.

A l'heure actuelle, parmi ces postes, seul le poste de Goderville est automatisé, mais sans diffusion de l'information en temps réel. D'autres postes appartenant à des organismes indépendants existent (celui du SRPV près d'Yvetot, par exemple), mais dont la vocation n'est pas non plus d'être diffusée en temps réel à l'extérieur.

Néanmoins, dans un proche avenir, d'intéressantes perspectives semblent se dessiner :

- Météo-France est en cours de déploiement d'un réseau national de stations automatiques, le réseau Radôme, dont l'objectif est de fournir des informations en temps réel aux prévisionnistes. L'un des postes du département au moins se situera en Pays de Caux.
- La DIREN Haute-Normandie a formulé l'intention de développer un réseau de pluviomètres automatisés, dont la vocation serait justement de mettre les informations à la disposition du public via Internet.

A titre indicatif, on représente ci-après une cartographie représentant la synthèse de ces projets sur la Seine-Maritime, à partir du scénario optimal de 18 postes pour la DIREN, des postes existants et du futur réseau Radôme :

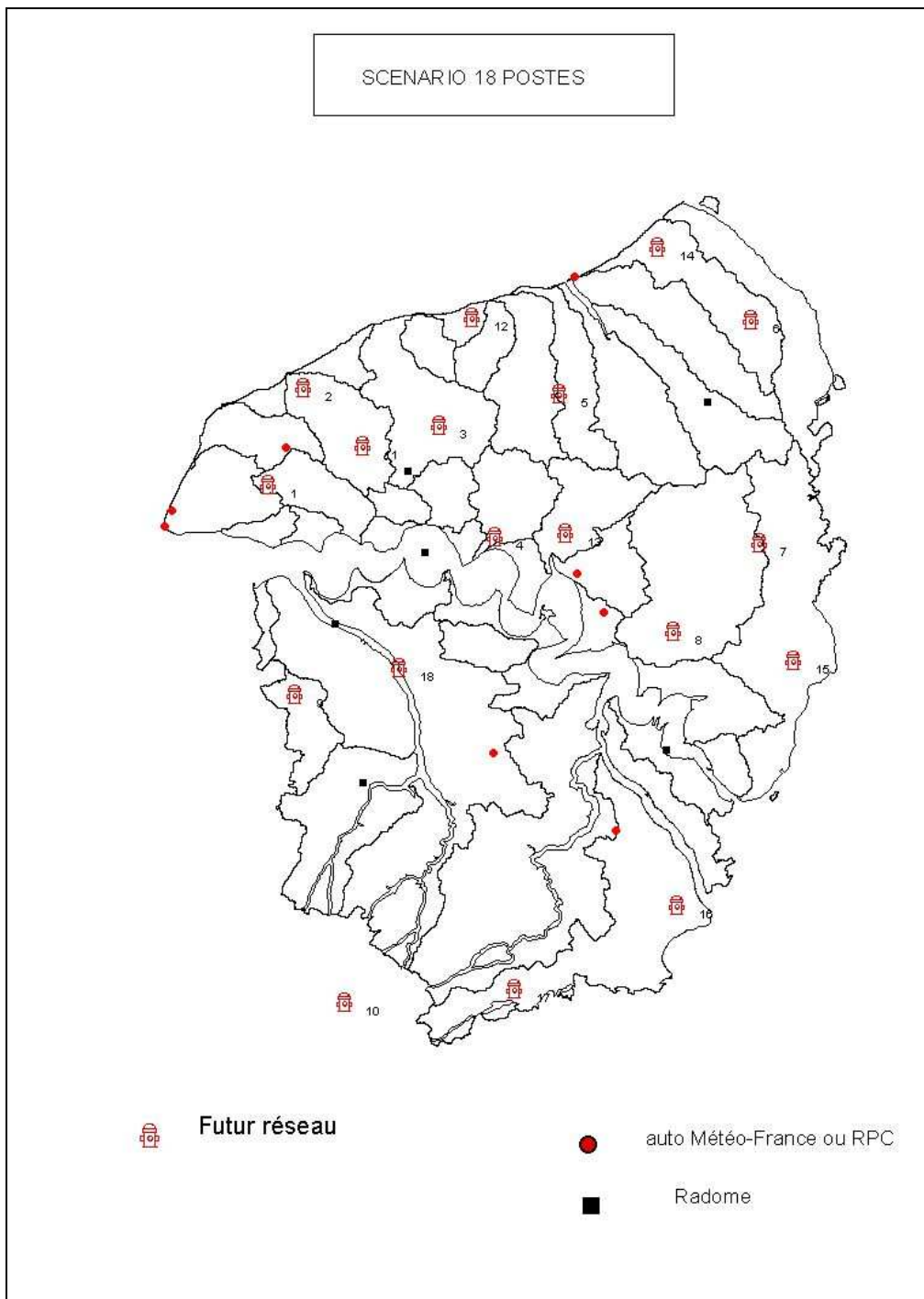


Figure 31 : Scénario d'implantation du futur réseau de la DIREN (d'après Helloco, 2002)

On constate qu'en terme de densité de postes, cette situation projetée remplit tout à fait les besoins exprimés ici.

En ce qui concerne le réseau radar, qui est géré par Météo-France, la situation est la suivante :

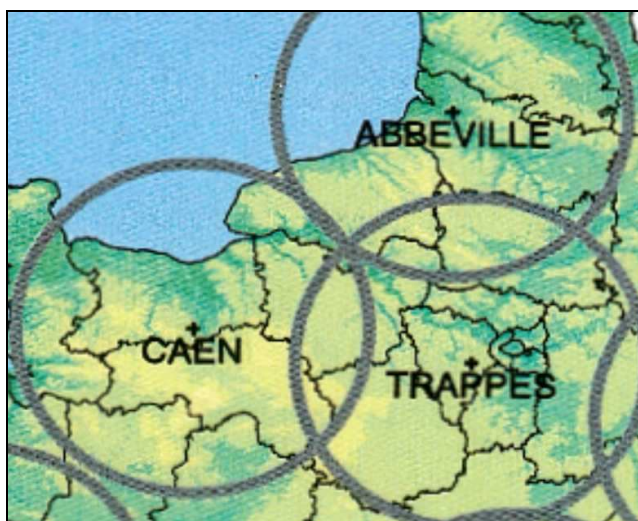


Figure 32 : la couverture du réseau de radars de Météo-France

Trois radars situés respectivement à Falaise (et non Caen), Trappes et Abbeville permettent de surveiller la Seine-Maritime au moins en partie. Les cercles représentés en gris se situent à une distance de 100 km de chaque radar, ce qui correspond approximativement à leur portée utile en matière d'estimation quantitative. Cette portée a d'ailleurs tendance à diminuer en période hivernale.

Il convient donc de rester prudent sur l'estimation quantitative en temps réel des précipitations par radar sur le type de pluie envisagé ici. En effet, la portée utile du radar est nettement plus limitée que pour les pluies orageuses estivales. A tout le moins, une comparaison entre les données pluviographiques dans le passé proche est utile pour juger de la pertinence de l'estimation radar. Une estimation plus qualitative sur la présence et le déplacement des principales zones de pluie, obtenue par les images dites « composites », poserait moins de difficultés.

### **8.3. La prévision des précipitations**

#### **8.3.1. Généralités sur la prévision des précipitations**

Pour présenter les principes et l'état actuel des techniques de prévision des précipitations, il nous est apparu utile d'en détailler les méthodes. Cette présentation se trouve en annexe du présent rapport.

On se contentera d'en rappeler ici les principaux éléments :

- Il n'est pas possible, à des échéances supérieures à quelques heures, de considérer la prévision des précipitations indépendamment de celle des autres paramètres météorologiques : elle se situe dans le cadre général de la modélisation numérique de l'atmosphère.
- Cette modélisation inclut plusieurs phases : l'observation des conditions météorologiques sur de vastes surfaces, nettement plus étendues que la zone d'intérêt (concrètement l'observation s'effectue sur le globe entier), l'utilisation des équations d'évolution de l'atmosphère, et l'adaptation finale de la prévision.
- Les précipitations restent l'un des paramètres les plus difficiles à prévoir, et en particulier, les prévisions « brutes » issues des modèles méritent d'être supervisées par des spécialistes.

- Pour des échéances inférieures à la demi-journée, en revanche, les modèles souffrent de limitations liées à leur dynamique interne. On a recours pour les échéances les plus courtes (jusqu'à quelques heures) à des extrapolations de l'observation, essentiellement les radars.

### **8.3.2. Présentation de quelques produits ou méthodes susceptibles de contribuer aux besoins**

#### L'offre de Météo-France

En premier lieu, le modèle général de prévision développé par Météo-France, appelé Arpège, est opérationnel maintenant depuis 1992. Il dispose d'originalités entre autres d'une représentation spatiale à maille variable, à résolution maximale centrée sur la France. Cette maille est de 30 km de côté sur la France. La représentation verticale est de 31 niveaux. A ce premier modèle est couplé un second modèle, à domaine limité, appelé Aladin. Celui-ci présente également une maille variable, avec une résolution maximale de 10 km sur la France. Aladin est initialisé avec les prévisions du modèle Arpège, et possède une description de la physique assez proche du précédent, mais sa plus forte résolution lui permet une prévision plus fine. Ces prévisions de pluie fournies par le modèle sont ensuite supervisées par les prévisionnistes de Météo-France.

Météo-France propose pour diffuser ses informations d'observation et de prévision toute une gamme de produits allant de la diffusion grand public au service spécialisé. Les détails nous ont été fournis lors d'une discussion avec M. PAJANIRADJA, Responsable du Centre Départemental de la Météorologie de Rouen-Boos. Nous retiendrons dans notre cadre les éléments suivants :

- les différents types d'image radar (composite, cumul lame d'eau, ...) peuvent être utilisées en temps réel selon divers accès : MétéoPro sur Internet pour quelques images ponctuelles, abonnement régulier sur le site Internet, ou achat de la licence « METEO + » pour un suivi constant. METEO + reste un outil de travail d'aide à la décision dont l'orientation est modulable (version hydrologique, version routière...).
- la prévision quantitative des précipitations hivernales à J+1 ou J+2, avec une précision compatible avec les besoins exprimés, semble maintenant possible. En opérationnel, on semblerait s'orienter sur la prévision en quelques points de référence où l'observation serait par ailleurs effectuée. Dans ces conditions, M. PAJANIRADJA indique qu'une telle évaluation devrait ressortir d'une assistance spécifique, plus à même d'apporter la précision souhaitée que des produits standards.

#### Autres modèles

Naturellement, d'autres centres météorologiques mettent en œuvre des modèles globaux, ayant des vocations voisines (Etats-Unis, Canada, Angleterre, Allemagne, Japon).

On ne retiendra ici que deux d'entre eux ayant une proximité géographique susceptible de fournir des indications utiles sur notre zone.

Le modèle du Centre Européen (CEPMNT) : Le Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (ECMWF pour l'acronyme anglais) est une structure originale, basée à Reading en Angleterre, résultant de la coopération de pays européens, dont la mission initiale était de développer un modèle capable d'étendre la prévision au-delà de l'échéance de 3 jours qui constituait une limite à cette époque. Il rassemble des chercheurs et des météorologistes, souvent issus des services des pays membres, et établit également des coopérations avec ceux-ci.

Un modèle global de prévision a été élaboré. D'une résolution plus faible que le modèle Arpège, il étend l'échéance jusqu'à 10 jours, seule la prévision jusqu'à 7 jours étant délivrée au grand public. Le CEPMMT l'assortit de notions probabilistes. Signalons également qu'outre sa mission de base, cet organisme a étendu son activité vers d'autres domaines (prévision saisonnière, diffusion de produits).

Les produits du Met Office : le service météorologique anglais développe des produits assez similaires à ceux de Météo-France. En particulier, certains produits d'observation ou de prévision immédiate couvrent les zones voisines de la Manche avec une bonne résolution spatiale.

#### Adaptation statistique par analogues

Nous avons vu précédemment que la prévision finale des précipitations sur les zones de l'utilisateur nécessitait une adaptation (spatiale, temporelle) et une supervision des champs prévus par le modèle.

Une méthode originale pour réaliser cette phase a été développée conjointement par EDF et le LTHE, laboratoire de l'Université de Grenoble. Elle consiste à utiliser directement des relations statistiques entre le champ dynamique analysé (ou prévu) par modèle (pression, vent) et la lame d'eau sur le bassin-versant de l'utilisateur. Sous l'hypothèse de base que deux situations météorologiques générales semblables produisent des pluies locales semblables, la relation statistique va consister à rechercher dans le passé les situations analogues à la situation analysée (ou prévue), afin de prévoir la lame d'eau correspondante. En pratique, c'est un ensemble de situations proches qui sera sélectionné, et la prévision va pondérer les différentes lames d'eau correspondantes.

Cette méthode est opérationnelle depuis plusieurs années à EDF, pour les besoins de la gestion hydro-électrique. Des tests de comparaison menés lors de certaines expérimentations dans les Alpes ont montré des performances meilleures que le modèle de base utilisé (Arpège en l'occurrence).

Ceci peut s'expliquer par le fait que cette méthode utilise directement l'information dynamique pour la transformer statistiquement en lame d'eau « finale », alors que dans le modèle, il convient de passer d'abord par la phase physique du calcul du cycle de l'eau, qui comporte de nombreuses simplifications, puis de procéder à l'adaptation spatio-temporelle.

La méthode ne nécessite pour sa mise en œuvre que des moyens de calculs relativement légers, et se base sur une double archive de situations générales analysées par des modèles et de lames d'eau observées. Elle peut utiliser en entrée les analyses de divers modèles (Arpège, Centre Européen), et pourrait donc être assez facilement adaptée au contexte de notre étude.

#### 8.4. Brève analyse de la situation météorologique de quelques événements

Pour mieux illustrer l'apport potentiel des observations et prévisions météorologiques, nous allons analyser plus en détail le déroulé chronologique de trois événements ayant conduit à des désordres hydrologiques importants.

Nous utiliserons pour cela, outre les données pluviométriques à notre disposition, des cartes de situation météorologique disponibles sur Internet. Certes, celles-ci ne sauraient se substituer à une véritable simulation de prévision de précipitations (action intéressante, mais qui sortirait du cadre de la présente étude), mais elles ont le mérite de bien exposer les principaux éléments de la situation météorologique et de son évolution. Elles ne sont malheureusement archivées sur le site consulté que depuis l'année 1998. C'est pourquoi nous avons été amenés à limiter nos illustrations à une période fertile en événements, celle du 24 au 31 octobre 1998.

**Situation du 24 octobre 1998, 6h TU (soit 7h légales)**

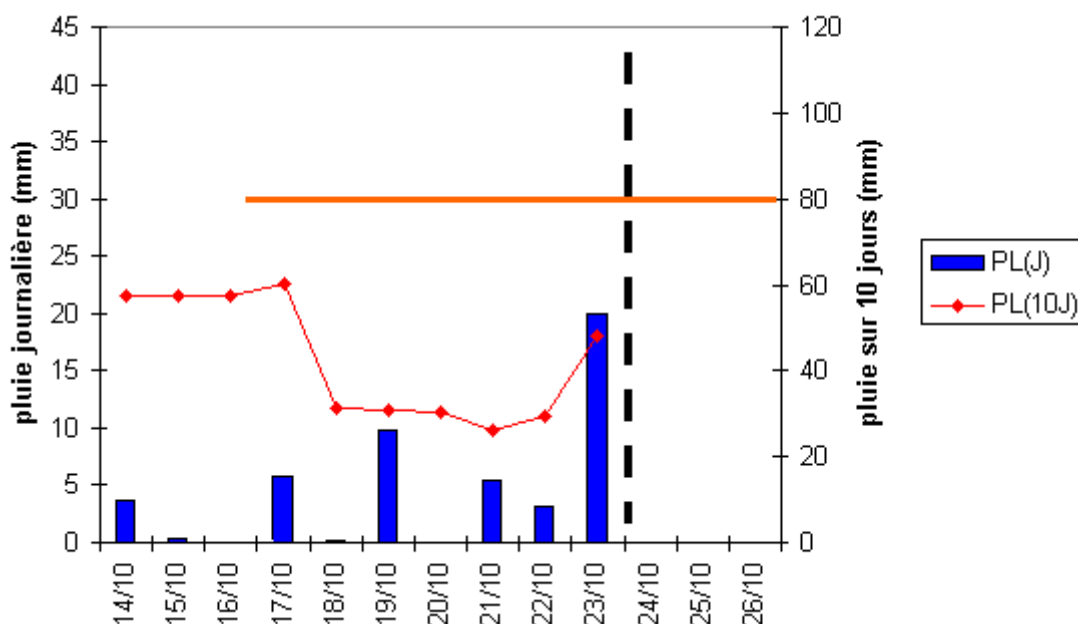


Figure 33 : Précipitations observées pendant la décade précédant le 24/10/98 (voir texte pour la légende)

Le 24 octobre au matin (date matérialisée par le trait pointillé vertical), on note que la pluviométrie cumulée sur les 10 jours précédents (courbe rouge) atteint plus de 40 mm, mais que les pluies de la veille ont atteint 20 mm (les pluies quotidiennes sont représentées par les barres bleues). Pour atteindre le seuil de 80 mm, il faut que la pluie atteigne 40 mm.

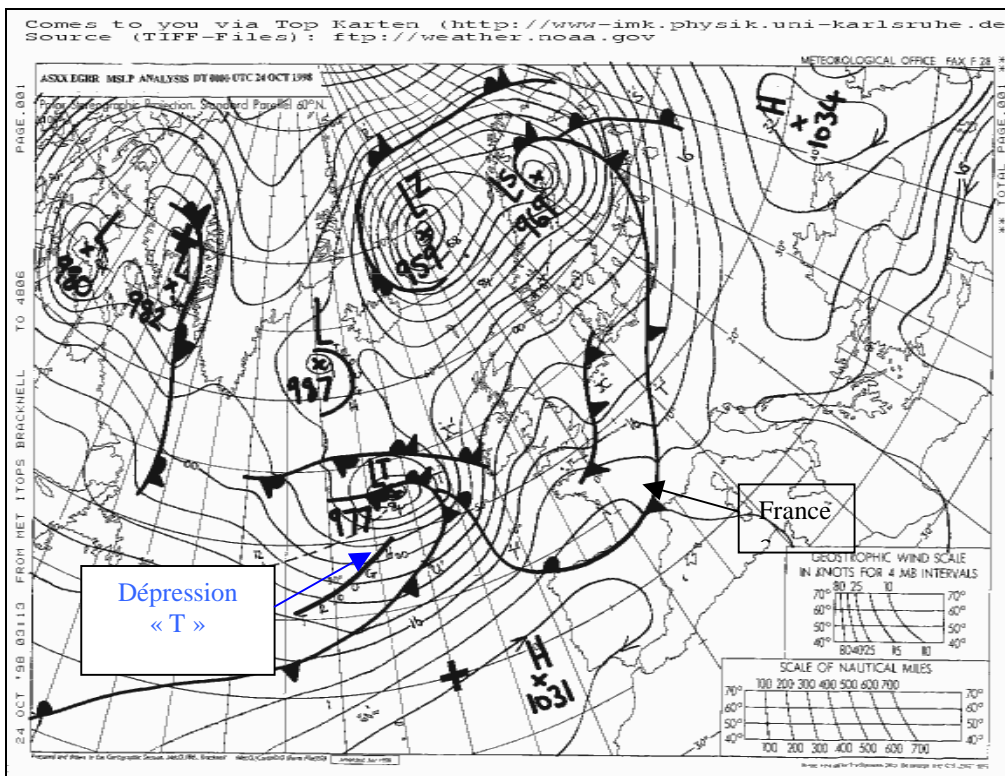


Figure 34 : situation météorologique le 24/10/98 à 0hTU

La Figure 34 représente les éléments généraux de la situation météorologique, à savoir le champ de pressions au niveau du sol, ainsi que le tracé des fronts. Cette carte est prise à 0hTU, soit en décalage de 6 heures avec le relevé pluviométrique (seule heure disponible dans l'archive ; en temps réel, ce type de carte est émis toutes les 6 heures).

L'élément le plus marquant est la présence d'une dépression très creuse (977 hPa), notée « T », circulant dans un courant d'ouest assez marqué. Incontestablement, ce type de système est susceptible de produire des pluies importantes. L'enjeu est donc de savoir si notre zone d'étude se trouvera sur sa trajectoire.

#### Situation du 25 octobre 1998, 6h TU (soit 7h légales)

Comme précédemment, suivons l'évolution de la pluviométrie sur Goderville :

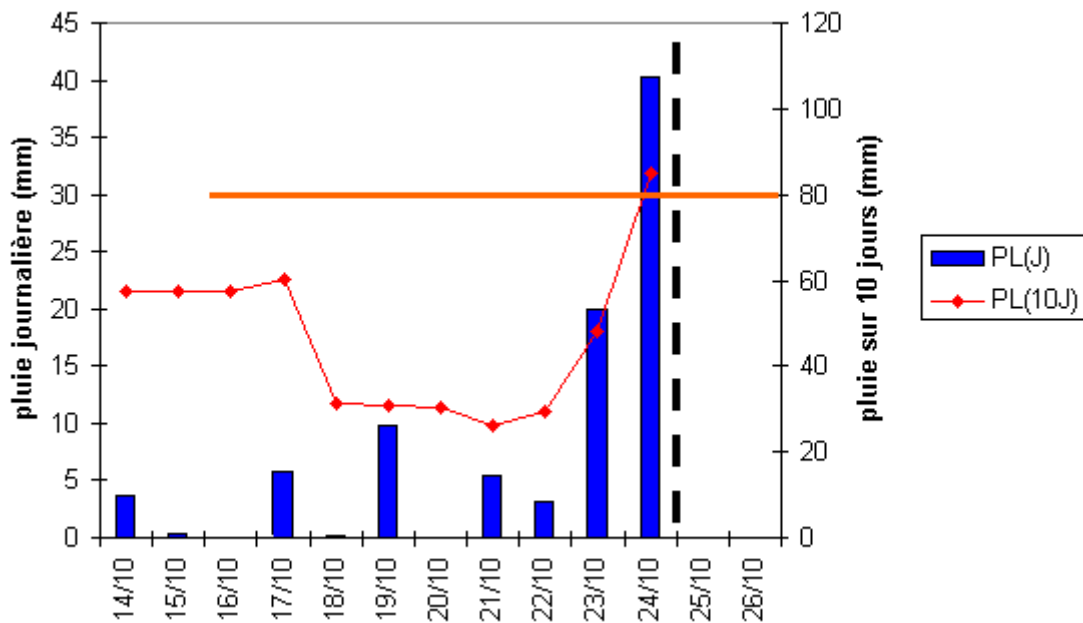


Figure 35 : Précipitations observées pendant la décade précédant le 25/10/98

La pluie observée depuis la veille a été particulièrement importante (plus de 40 mm). En conséquence, le seuil de 80 mm en 10 jours a été franchi. On sait par ailleurs que des problèmes liés aux inondations ont été observés depuis plusieurs heures. Voyons comment cette situation se traduit sur les cartes météorologiques :

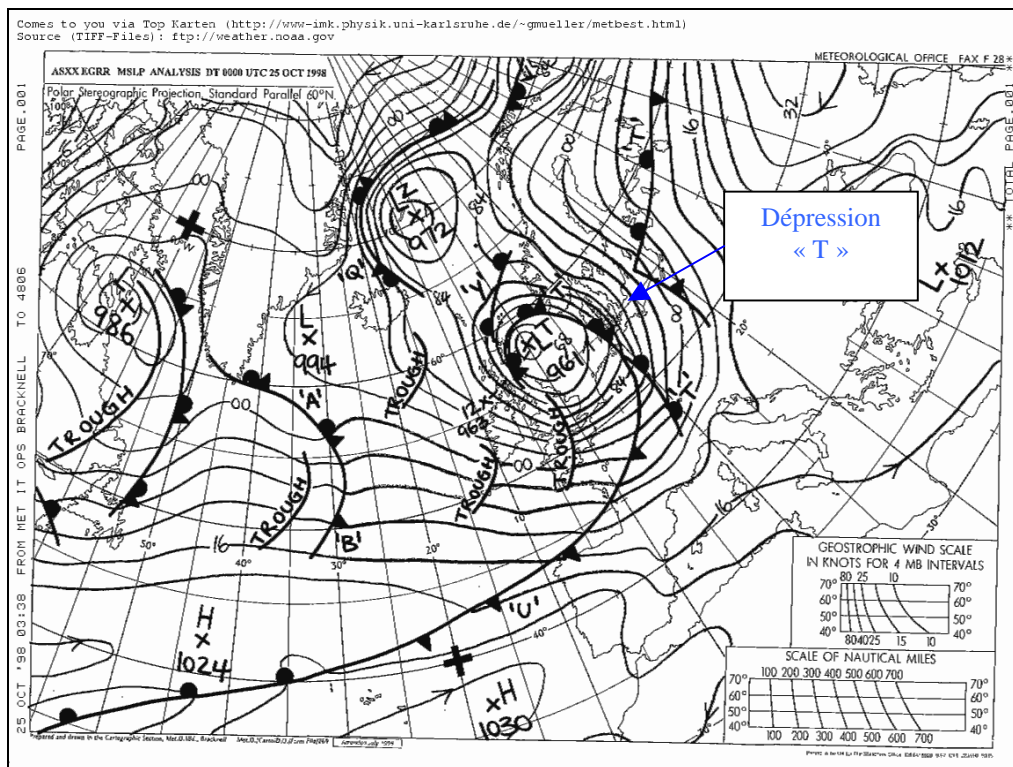


Figure 36 : situation météorologique le 25 octobre à 0hTU

La dépression T s'est encore creusée (le minimum atteint 961 hPa), et son centre se situe maintenant en Mer du Nord. Le déplacement a donc été extrêmement rapide, et la perturbation associée a largement traversé la Manche, et donc concerné la zone d'étude. Qui plus est, la traîne est probablement très active, s'accompagnant encore de fortes averses au moment où la carte est émise. « L'objet météorologique » à la source des fortes précipitations était donc relativement identifié, et son déplacement pouvait être analysé en détail.

Par conséquent, sur ce type d'événement, la prévision d'une part, et le suivi régulier des pluies d'autre part se seraient révélés indispensables. Ainsi, une prévision de l'ordre de grandeur des pluies aurait permis une première mise en vigilance. Un suivi des observations pluviométriques sur quelques postes de référence, par pas de 3 heures par exemple, aurait sans doute permis de voir le cumul se constituer progressivement, et de confirmer l'imminence des problèmes.

Au cours de la journée du 25 octobre, la tempête s'est définitivement éloignée en direction du nord-est et la pluie a été faible. Par la suite, des pluies se sont encore régulièrement déroulées, avec moins d'intensité cependant, comme le montre la situation pluviométrique de Goderville le 31 octobre au matin :

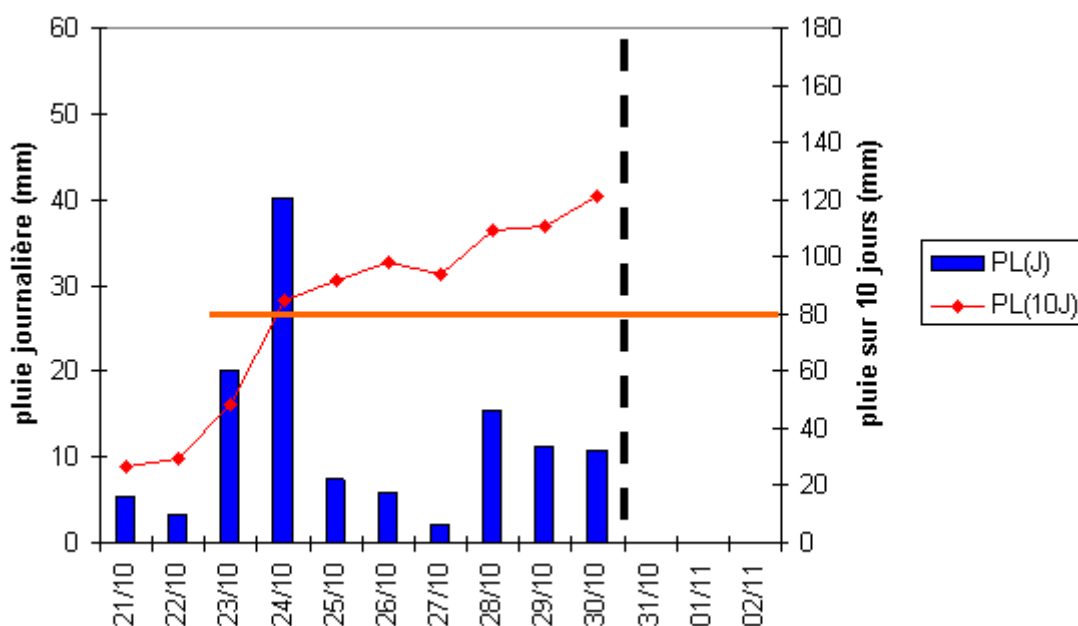


Figure 37 : Précipitations observées pendant la décade précédant le 31/10/98

Le cumul décadaire atteint maintenant la valeur conséquente de 120 mm, suite à la répétition régulière de pluies modérées depuis plusieurs jours. Celles-ci n'ont cependant pas déclenché de troubles hydrologiques excepté le 30, où 6 communes semblent avoir été inondées d'après la presse, des débits importants (période de retour > 2 ans) sont notés sur les stations DIREN et des ruissellements sur le poste AREAS de Bourville. La situation est donc « tangente », et l'analyse météo primordiale.

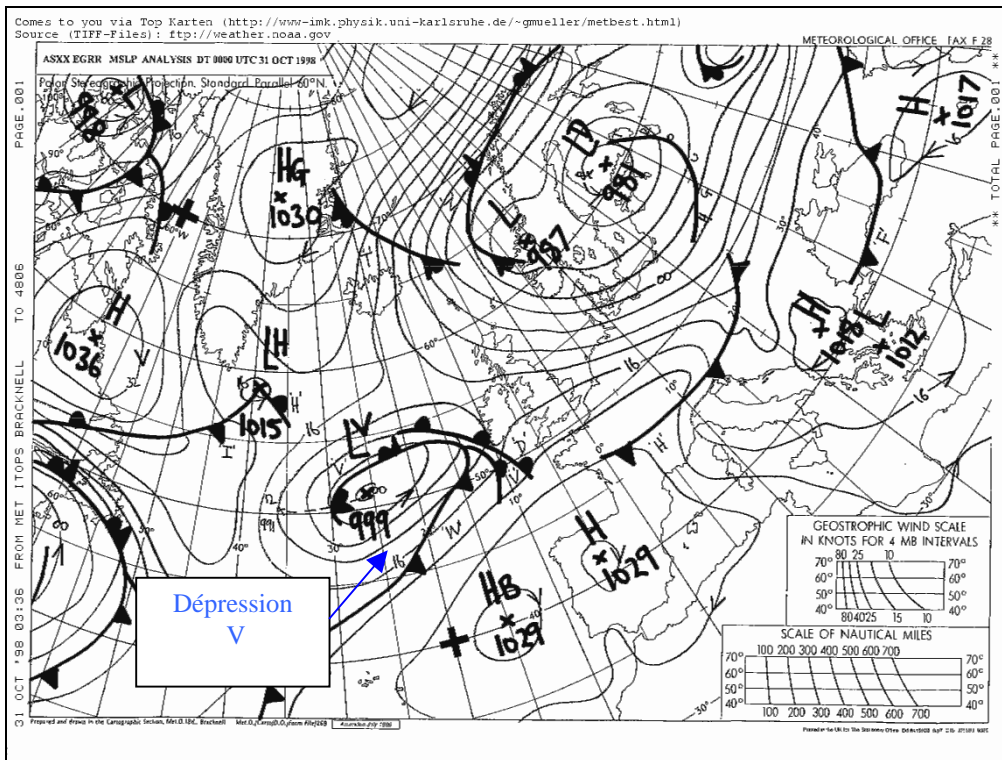
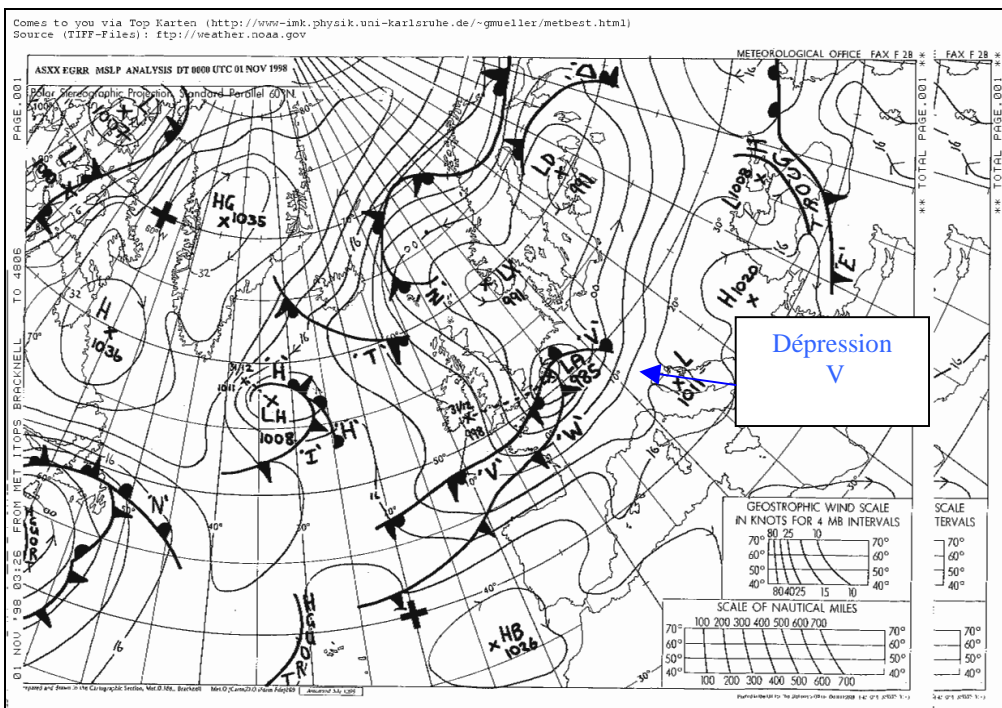


Figure 38 : situation météorologique le 31 octobre à 0h

On voit malheureusement qu'une nouvelle dépression, baptisée « V » est bien visible sur la carte, et accompagnée d'un système frontal complexe qui aborde déjà la pointe Bretagne, ce qui laisse présager de nouvelles pluies.



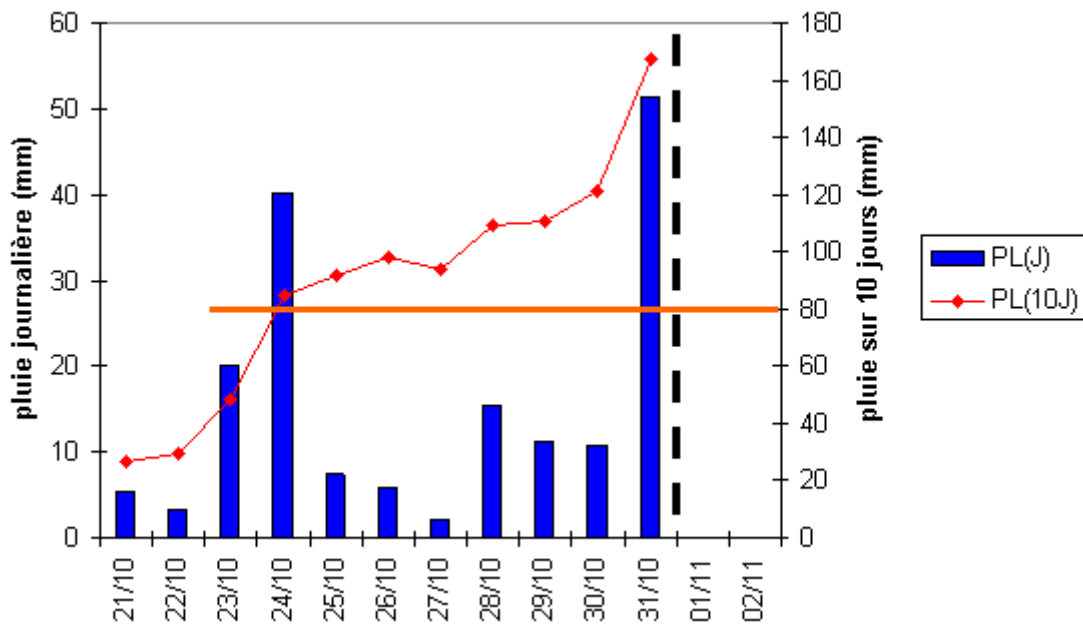


Figure 40 Précipitations observées pendant la décade précédant le 1/11/98

Les conséquences en terme de précipitations sont d'ailleurs très fortes, puisque 50 mm ont été observés sur la journée à Goderville. Les dégâts eux aussi ont été considérables, puisqu'au moins 36 communes ont été inondées ; par ailleurs des débits de durées de retour > 10 ans ont été observés par la DIREN, et de très forts ruissellements par l'AREAS.

Néanmoins, compte tenu de la situation observée en terme de cumul décadaire, et de l'approche de la dépression « V », l'alerte aurait pu être donnée très tôt.

## 9. Conclusion et perspectives

Rappelons que l'étude avait pour objectif d'étudier la faisabilité d'une anticipation des désordres hydrologiques occasionnés par les pluies « hivernales » (pendant la période d'octobre à avril).

En effet, à l'inverse des désordres provoqués par les orages estivaux, une analyse bibliographique avait montré que ceux-ci pourraient bénéficier d'une certaine anticipation : des études menées par l'INRA sur la période 1965-1985 montraient que les désordres observés surviennent après un cumul de pluie décadaire d'environ 80 mm, se terminant par une dernière journée de pluie d'au moins 15 mm. Des travaux plus récents menés par l'AREAS allaient dans le même sens. Si l'existence de telles conditions seuils pouvait être confirmée, la mesure régulière de pluie sur un bassin-versant, complétée par des prévisions de précipitations sur les heures ou les jours suivants pourrait permettre de constituer des éléments de mise en vigilance.

Nous avons donc cherché à les vérifier à partir de données plus récentes, incluant des observations pluviométriques et hydrologiques plus nombreuses et plus étoffées.

Le domaine d'étude que nous avons défini couvre l'essentiel du Pays de Caux, zone côtière comprise, qui présente une certaine homogénéité du point de vue de la réponse hydrologique à ce type de phénomène, et qui est le plus fréquemment soumis aux désordres hivernaux.

Dans un premier temps, nous nous sommes appuyés sur le fichier des déclarations au titre du régime « CatNat ». Malheureusement, leur datation s'est révélée trop imprécise pour être utilisée comme source unique dans notre étude. Nous nous sommes alors tournés vers d'autres données, comme les coupures de la presse régionale et locale, les débits mesurés par la DIREN et les mesures de ruissellement sur les sites instrumentés par l'AREAS.

Grâce à une analyse conjointe de l'ensemble de ces sources, nous avons pu construire une base de données sur la période 1992-2000, contenant une quarantaine d'événements de « désordres hydrologiques », que nous avons ensuite classés en 3 classes d'intensité.

Les données pluviométriques conjointes ont été également analysées. Elles proviennent principalement des postes du RPC (Réseau Pluviométrique Complémentaire de l'Agence de l'Eau) situés sur le plateau du Pays de Caux, des pluviographes de l'AREAS, ainsi que des postes de Météo-France pour certains événements.

On a cherché à établir les correspondances entre périodes de pluie (supérieures à un seuil donné, pour des cumuls sur n jours) et dates de désordres. On a établi pour la synthèse des tables de contingences. La série du poste de Goderville s'est révélée constituer la meilleure référence pour cela. La correspondance s'est révélée la meilleure pour un seuil de 80 mm et une durée décadaire, ce qui confirme au moins en partie les valeurs proposées dans la bibliographie.

Néanmoins, si le lien « diagnostic » est bon, le lien « pronostic » est plus difficile à établir à partir d'observations quotidiennes pour caractériser les pluies « génératrices » de l'événement.

Seules les données à pas de temps fin de l'AREAS, portant sur un nombre d'événements plus limité, ont permis de caractériser ces pluies. Il apparaît bien que les ruissellements importants apparaissent à partir d'un seuil de précipitations décadaires et d'une pluie génératrice d'au moins 15 mm.

Ceci semble confirmer la possibilité générale d'anticiper les désordres hydrologiques d'hiver dans cette région, à condition de pouvoir disposer de produits météorologiques adaptés, ne se limitant pas aux pluies quotidiennes, mais intégrant des observations à pas de temps plus fin et des prévisions de pluie dans un délai de quelques heures à la journée.

**Les conclusions de cette étude de faisabilité nous permettent de tracer des perspectives selon les axes suivants :**

Des améliorations de la méthode nous paraissent possibles en prenant en compte l'état du sol lié aux différentes phases du travail agricole. En effet, l'influence de ce facteur a été notée dans les modifications des seuils de déclenchement des désordres, notamment pour les mois d'octobre, de novembre et d'avril. Pouvoir disposer en temps réel d'un paramètre global sur la phase d'avancement des travaux agricoles permettrait de moduler ces seuils en fonction de la saison.

Par ailleurs, la méthodologie décrite ici reste générale et définie pour l'ensemble de la zone d'étude. Des ajustements plus locaux, caractérisant chaque bassin-versant, permettraient peut-être d'affiner les anticipations.

Nous avons souligné l'apport potentiel des prévisions de pluie à un délai de quelques heures à une journée. Pour quantifier ces apports, il serait intéressant de procéder tout d'abord à une simulation en temps différé, en reprenant les principaux événements de la base de données décrite. Dans un 2<sup>ème</sup> temps, un test en temps réel serait souhaitable. Celui-ci pourrait par exemple avoir lieu pendant la prochaine période hivernale de 2003/2004.

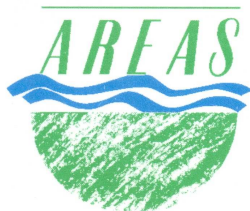
Enfin, rappelons que la perspective finale de ce travail est la mise en place opérationnelle d'un système d'anticipation des désordres hydrologiques hivernaux. Pour cela, l'identification de services potentiels intéressés par cette démarche, les conditions techniques et administratives dans lesquelles cet intérêt pourrait se manifester sont des actions qui devront être menées. Par la suite, il conviendra de définir le meilleur accompagnement possible du système (formation des utilisateurs finaux, suivi des performances du système, etc...).

## Références bibliographiques

- BOIFFIN J.**, 1984, *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*, Thèse de doctorat INA-PG
- BOIFFIN J., MONNIER G.**, 1985, *Infiltration rate as affected by soil surface crusting caused by rainfall*, International symposium on the assessment of soil surface sealing and crusting. Ghent, Belgium 1985, pp 210-217.
- BOIFFIN J., PAPY F., EIMBECK M.**, 1988, *Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. I.- Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion*, Agronomie, 8 (8), pp. 663-673
- BRESSON L. M., BOIFFIN J.**, 1990, *Morphological characterization of soil crust development stages on an experimental field*, Geoderma, 47 : 301-325.
- BRGM**, 2000, *Atlas régional Aléa érosion en Haute-Normandie*, rapport BRGM/RP-50454-FR
- DRDAF 76**, 2002, *Atlas des bassins versants de Seine-Maritime, cartographie et indicateurs statistiques*, 33 pages
- COLLANGE B., CACHELEUX G.**, 1999, *Archivage et exploitation des données pluviométriques et débitmétriques sur 4 sites pilotes de Seine-Maritime. Année 1998*, Rapport AREAS
- GOVERS G.**, 1991, *A field study of topographical and topsoil effects on runoff generation*, Catena 18 91-111
- INSPECTION GENERALE DE L'ENVIRONNEMENT**, 2001, *Inondations et coulées boueuses en Seine-Maritime : propositions pour un plan d'action*, Rapport de l'Inspection Générale de l'Environnement, n° IGE/00/032
- KING D.**, 2001, *Etats de surface et ruissellement, l'approche par télédétection*, in. Colloque SHF, Imagerie radar et satellitaire au service de l'eau, Toulouse
- LEROY B.**, 2001, *Aide à la prévision des épisodes turbides dans le Pays de Caux*, Stage de maîtrise des sciences et techniques, Université de Rouen.
- OUVRY J.-F., COLLANGE B., CACHELEUX G.**, 2000, *Archivage et exploitation des données pluviométriques et débitmétriques sur 4 sites pilotes de Seine-Maritime. Année 1999*, Rapport AREAS
- PAPY F., BOIFFIN J.**, 1988, *Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. II.- Evaluation des possibilités de maîtrise du phénomène dans les exploitations agricoles*, Agronomie, 8 (9), pp. 745-756
- PAPY F., DOUYER C.**, 1988, *Les déterminants des catastrophes liées au ruissellement des terres agricoles en Pays de Caux*, Rapport INRA

**ROTH C.H., JOSCHKO M.**, 1991, *A note on the reduction of runoff from crusted soils by earthworm burrows and artificial channels*, Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 154, 101-105

**SCHWAB G., FANGMIER D., ELLIOT W., FREVERT R.**, 1993, *Soil and water conservation engineering – fourth edition*, éditions Wiley, 507 pages



Jean-François OUVRY  
Jean-Baptiste RICHET

*François HELLOCO - Consultant*

## **Système d'anticipation des épisodes pluvieux hivernaux générateurs de désordres hydrologiques**

Etude de faisabilité

# ANNEXES



Etude réalisée en mars 2003



## TABLE DES MATIERES

|  |    |
|--|----|
| Annexe 1 : les sites de mesure pluie-ruissellement en vallée sèche de l'AREAS, principes de mesures .....                    | 3  |
| Annexe 2 : Exemple de cartographie des événements Cat Nat .....  | 5  |
| Annexe 3 : un exemple de coupure de presse.....  | 6  |
| Annexe 4 : un exemple d'extrait cartographique de la base de données d'informations issues de la presse.                     | 7  |
| Annexe 5 : les données sur les événements ruisselants de l'AREAS.....  | 8  |
| Annexe 6 : analyse des événements qui ne remplissent pas les conditions de fort ruissellement sur les sites de l'Aréas ..... | 14 |
| Annexe 7 : quelques éléments sur la prévision des précipitations .....   | 22 |

## Annexe 1 : les sites de mesure pluie-ruissellement en vallée sèche de l'AREAS, principes de mesures

Cette annexe présente le schéma de fonctionnement et les principes des mesures enregistrées sur nos sites. Le matériel présent et le principe de son fonctionnement est montré sur la Figure 1.

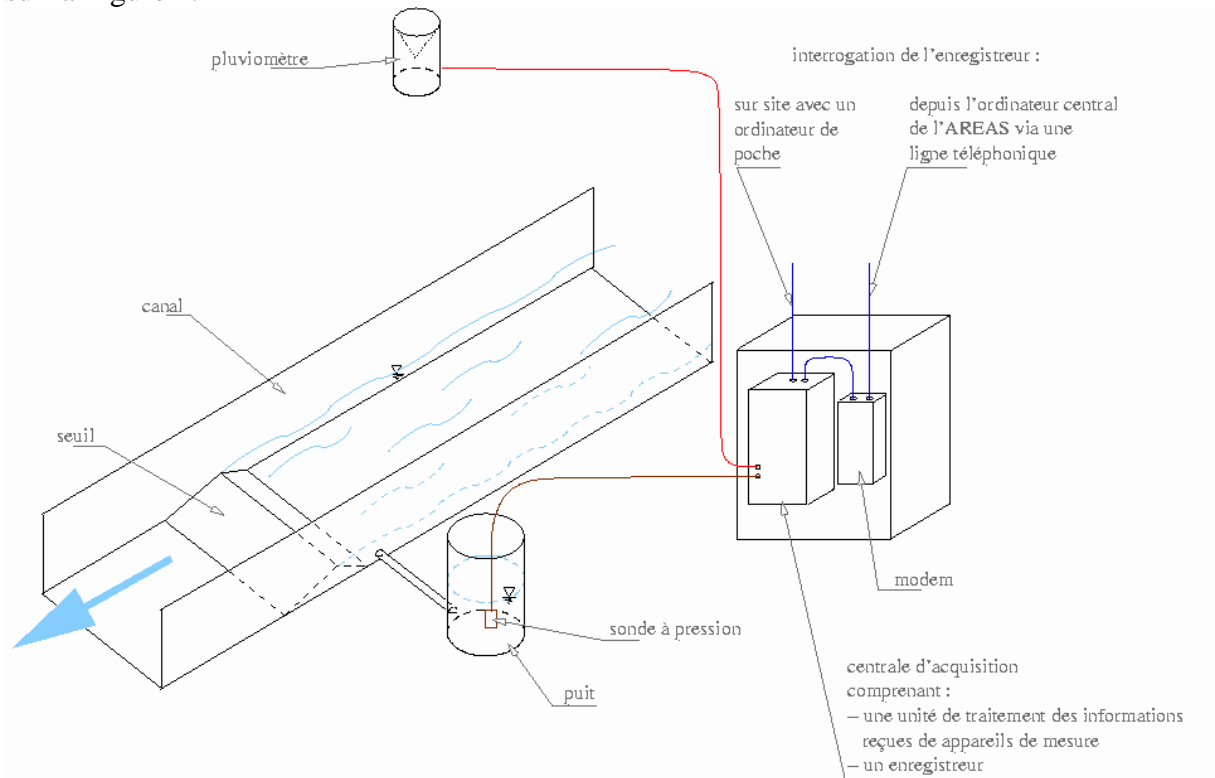


Figure 1 : schéma d'une station de mesure en vallée sèche

### mesure de la précipitation

La précipitation est connue à l'aide d'un pluviomètre à auget basculeur : l'auget se remplit de l'eau recueillie par le cône du pluviomètre jusqu'à atteindre le volume qui le fait basculer, mettant un autre auget identique vide en position d'être rempli. Le volume de l'auget est généralement équivalent à 0,2 mm de précipitations. L'enregistrement est constitué des dates de bascules, connues à la seconde près. On considère en première approximation que le volume de basculement d'un auget ne dépend pas de l'intensité pluvieuse.

### mesure du ruissellement

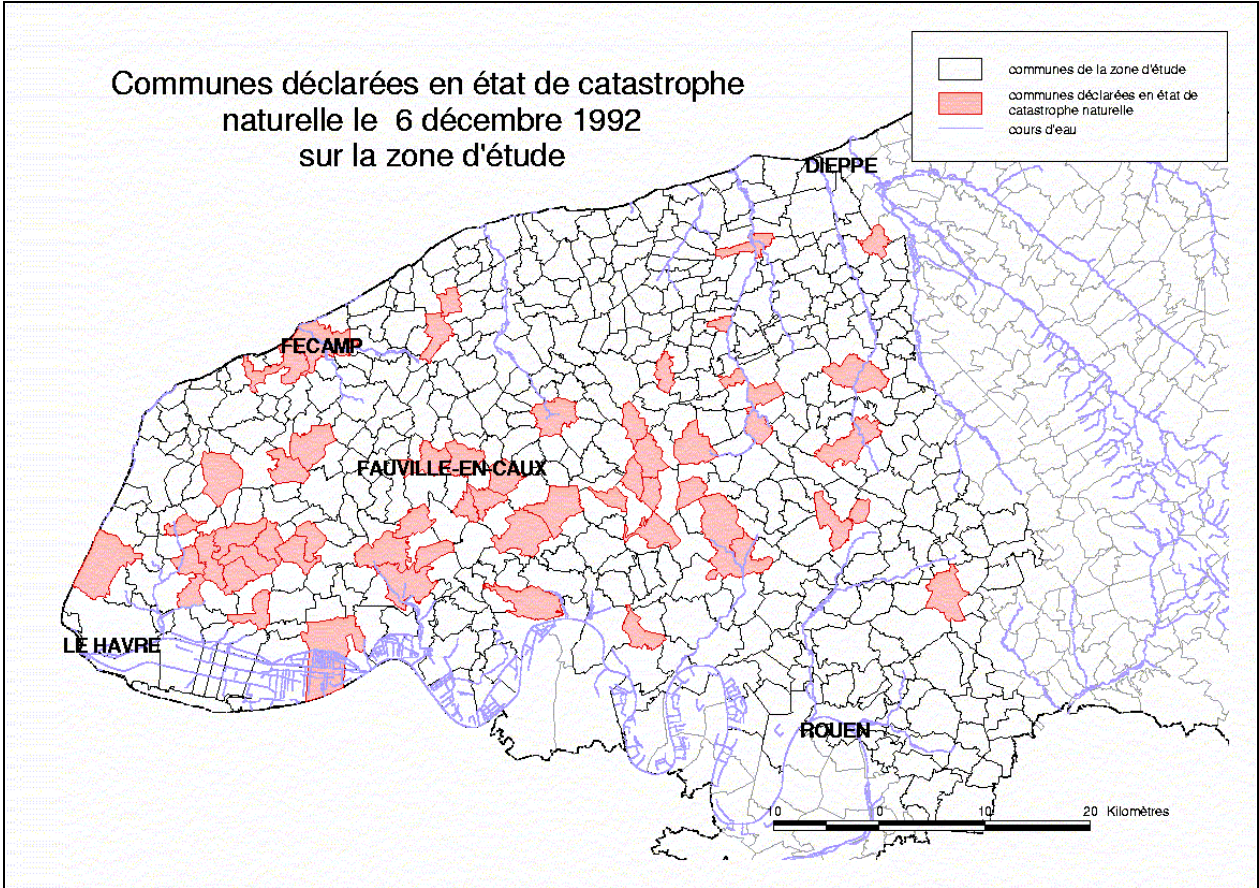
Pour quantifier le ruissellement, on mesure la hauteur d'eau dans le canal aménagé au fond du talweg. Cet aménagement permet d'avoir une relation univoque entre hauteur d'eau et débit : la courbe de tarage. Une valeur est enregistrée toutes les 5 minutes, ce qui nous permet de disposer d'un limnigramme (évolution des hauteurs d'eau dans le temps). Grâce à la courbe de tarage, on peut donc passer du limnigramme à l'hydrogramme (évolution des débits dans le temps). Il suffit alors d'intégrer la courbe de l'hydrogramme pour connaître le volume écoulé entre deux instants.

### suivi des stations de mesures

Un suivi de chaque site est indispensable pour en assurer la maintenance et rapatrier les données lorsque le site ne dispose pas du matériel permettant de l'interroger à distance. Ce suivi est effectué à un rythme hebdomadaire.

Une fois les données rapatriées et centralisées, il convient de les valider avant de pouvoir les exploiter.

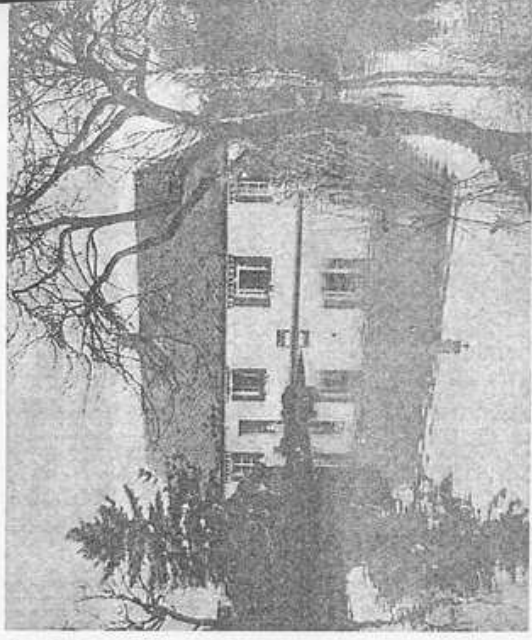
# Annexe 2 : Exemple de cartographie des événements Cat Nat



# Annexe 3 : un exemple de coupure de presse

## Le pays de Caux les pieds dans l'eau

*La terre n'en peut plus. Elle est gorgée d'eau. Alors, quand la pluie continue à arroser aussi abondamment et violemment le sol, ça ne pénètre plus. Résultat : depuis quelques jours, et plus spécialement depuis hier, des inondations. Les pompiers ne savent plus où pomper : cinq cent interventions en deux jours dans le département de Seine-Maritime.*



Sur un miroir d'eau à Allouville.

Partout en essence, on repousse l'eau, mais elle ne peut pas aller plus loin. A Pœufly, c'est le Saffimbec qui a débordé au cours de la nuit de dimanche à lundi. A Creville, en plein pays de Caux, on note un pas de violente, heureusement. Cependant, à Escau-les-Bains, une personne âgée a dû être évacuée : elle était contrainte dans sa maison où le niveau de l'eau avait déjà dépassé les cinquante centimètres.

A Abbeville, une grosse machine s'est mise au feu. Et, comblo de l'ironie, l'effondrement du terrain a fait éclater une conduite, privant les habitants... d'eau !

La voie ferrée s'est affaissée hier vers 11 h entre les gares de Motteville et de Grémoreville, situées

sur la ligne Monteville/Saint-Vallery-en-Caux. Toute circulation interrompue a été interrompue et la SNCF a mis en place un service de taxis.

A Saint-Véger, c'est le quartier de l'église et le village voisin de Fajot et d'Anglesseville qui ont été particulièrement touchés. A Grémoreville, toute la route a été inondée.

Plus près de Rouen, à Cleres, des pavillons situés en bas d'une côte ont été inondés et l'eau a traversé la route, envahissant le collège. Le C.E.S. a cependant pu fonctionner normalement, tout comme le lycée de l'avenue de la République, à Vieux-Bois, où l'eau est montée à trois mètres au-dessus du sous-sol. Par contre, à Vieux-de-Slans, les écoles ont été fermées, la rivière ayant débordé : la rue principale, les commerces et

### 500 interventions en deux jours

La préfecture de la Seine-Maritime a dressé un bilan des interventions pour dimanche et lundi. On dénombre 492 interventions : 237 pour des locaux privés ; 58 pour des tornades inondés ; 163 pour des habitations privées ; 34 pour des communes.

C'est le centre 18 du Havre qui détient le record avec 347 interventions sur Boheuc, Manvillelles, Cleres, Linthey.

### Que d'eau !

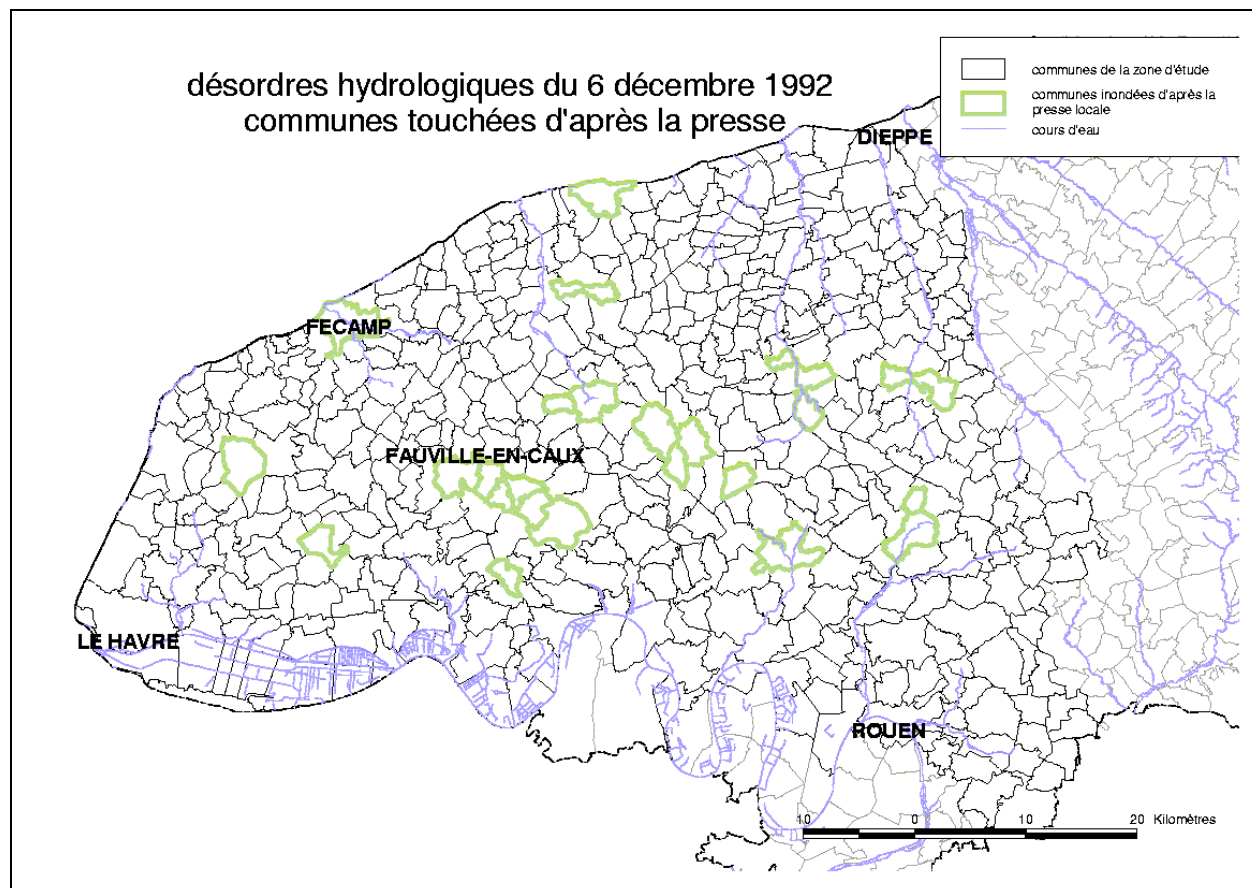


La sécheresse n'est bien qu'un mauvais (?) souvenir. Cet automne normand exceptionnellement pluvieux qui a considérablement retardé et dégradé les récoltes a, du même coup, compromis les nouveaux semis.

« Ça arrive environ une fois tous les vingt ans. En 1974, les producteurs de betteraves avaient dû faire appel à l'armée pour serrer les derniers tubercules. Cette année, la situation est au moins aussi grave. » Dans



## Annexe 4 : un exemple d'extrait cartographique de la base de données d'informations issues de la presse.



## **Annexe 5 : les données sur les événements ruisselants de l'AREAS**

| site        | debut                      | max                        | fin                        | classement | Qp spéc                    | LR               | P[j-9..evt] | début                      | fin                        | Pevt        | origine de la pluie |
|-------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------------|-------------|----------------------------|----------------------------|-------------|---------------------|
|             |                            |                            |                            |            | [Sruiss^0,8]<br>(m3/s/km2) | [Sruiss]<br>(mm) |             |                            |                            |             |                     |
| BRVL        | 24/01/1995 23:15:00        | 25/01/1995 03:30:00        | 26/01/1995 01:50:00        | 3          | 0,162                      | 5,509            | 53,5        | 24/01/1995 19:36:00        | 24/01/1995 20:25:00        | 18,5        | blpc_cr2m           |
| BRVL        | 26/01/1995 01:50:00        | 26/01/1995 12:15:00        | 27/01/1995 05:00:00        | 2          | 0,399                      | 5,424            | 75,1        | 26/01/1995 00:35:00        | 26/01/1995 12:25:00        | 15,2        | blpc_cr2m           |
| <b>BRVL</b> | <b>16/02/1995 22:26:00</b> | <b>17/02/1995 00:47:00</b> | <b>17/02/1995 14:46:00</b> | 1          | <b>0,335</b>               | <b>1,850</b>     | 40,8        | <b>16/02/1995 21:40:06</b> | <b>17/02/1995 13:56:19</b> | <b>13,4</b> | <b>blpc</b>         |
| <b>BRVL</b> | <b>25/02/1995 05:02:00</b> | <b>25/02/1995 07:01:00</b> | <b>25/02/1995 19:38:00</b> | 2          | <b>0,273</b>               | <b>1,837</b>     | 69,9        | <b>25/02/1995 02:36:12</b> | <b>25/02/1995 16:58:05</b> | <b>10,4</b> | <b>blpc</b>         |
| BRVL        | 03/03/1995 06:55:00        | 03/03/1995 15:12:00        | 04/03/1995 00:36:00        | 1          | 0,110                      | 0,907            | 38,0        | <b>03/03/1995 10:27:26</b> | <b>03/03/1995 18:06:57</b> | <b>14,8</b> | <b>blpc</b>         |
| BRVL        | 07/03/1995 21:07:00        | 07/03/1995 23:19:00        | 08/03/1995 11:04:00        | 1          | 0,086                      | 0,752            | 53,6        | <b>07/03/1995 18:57:01</b> | <b>08/03/1995 00:21:42</b> | <b>9,2</b>  | <b>blpc</b>         |
| BRVL        | 23/11/1996 05:29:00        | 23/11/1996 05:34:00        | 23/11/1996 09:15:00        | 0          | 0,005                      | 0,0067           | 41,8        | 23/11/1996 03:55:52        | 23/11/1996 05:51:45        | 6           | brvl                |
| BRVL        | 24/11/1996 18:44:00        | 25/11/1996 01:14:00        | 25/11/1996 08:15:00        | 0          | 0,003                      | 0,0427           | 49,6        | 24/11/1996 16:41:09        | 25/11/1996 01:06:29        | 5,8         | brvl                |
| BRVL        | 25/11/1996 14:34:00        | 25/11/1996 14:44:00        | 25/11/1996 17:59:00        | 0          | 0,003                      | 0,0051           | 49,6        | 25/11/1996 14:03:13        | 25/11/1996 14:42:24        | 2,6         | brvl                |
| BRVL        | 25/11/1996 17:59:00        | 25/11/1996 18:59:00        | 25/11/1996 20:54:00        | 0          | 0,001                      | 0,0038           | 63,2        | 25/11/1996 15:09:10        | 25/11/1996 17:58:54        | 0,4         | brvl                |
| BRVL        | 29/11/1996 10:19:00        | 29/11/1996 19:29:00        | 30/11/1996 05:19:00        | 0          | 0,012                      | 0,1604           | 44,0        | 29/11/1996 09:28:19        | 29/11/1996 16:50:16        | 16,6        | brvl                |
| BRVL        | 03/12/1996 09:19:00        | 03/12/1996 16:04:00        | 04/12/1996 00:44:00        | 0          | 0,003                      | 0,0460           | 44,6        | 03/12/1996 08:03:18        | 03/12/1996 19:10:54        | 11,4        | brvl                |
| BRVL        | 10/10/1997 04:59:00        | 10/10/1997 06:14:00        | 10/10/1997 10:17:00        | 0          | 0,008                      | 0,0299           | 41,2        | 10/10/1997 03:40:36        | 10/10/1997 07:14:57        | 17,8        | brvl                |
| BRVL        | 11/10/1997 12:19:00        | 11/10/1997 16:34:00        | 11/10/1997 21:04:00        | 0          | 0,007                      | 0,0513           | 59,8        | 11/10/1997 11:18:18        | 11/10/1997 17:26:33        | 17,4        | brvl                |
| BRVL        | 11/10/1997 21:04:00        | 12/10/1997 04:49:00        | 12/10/1997 17:59:00        | 0          | 0,057                      | 0,4445           | 78,4        | 11/10/1997 20:56:43        | 12/10/1997 03:35:58        | 21,6        | brvl                |
| BRVL        | 12/10/1997 17:59:00        | 12/10/1997 19:49:00        | 12/10/1997 22:44:00        | 0          | 0,001                      | 0,0064           | 101,6       | 15/10/1997 08:00:08        | 15/10/1997 08:45:18        | 3,2         | brvl                |
| BRVL        | 02/12/1997 13:19:00        | 02/12/1997 13:44:00        | 02/12/1997 21:29:00        | 0          | 0,003                      | 0,0299           | 35,0        | 02/12/1997 12:01:13        | 02/12/1997 18:10:15        | 8,6         | brvl                |
| BRVL        | 03/12/1997 06:29:00        | 03/12/1997 06:54:00        | 03/12/1997 10:44:00        | 0          | 0,002                      | 0,0099           | 45,8        | 03/12/1997 04:09:38        | 03/12/1997 07:19:11        | 4           | brvl                |
| BRVL        | 26/12/1997 11:57:00        | 26/12/1997 12:32:00        | 26/12/1997 15:17:00        | 0          | 0,004                      | 0,0025           | 42,2        | 26/12/1997 11:27:38        | 26/12/1997 12:45:37        | 4,6         | brvl                |
| BRVL        | 26/12/1997 23:47:00        | 27/12/1997 05:57:00        | 27/12/1997 15:57:00        | 0          | 0,008                      | 0,0793           | 47,8        | 26/12/1997 21:23:57        | 27/12/1997 02:59:08        | 9,4         | brvl                |
| BRVL        | 01/01/1998 22:42:00        | 01/01/1998 22:47:00        | 02/01/1998 01:51:00        | 0          | 0,003                      | 0,0003           | 42,2        | 01/01/1998 22:07:35        | 01/01/1998 23:46:32        | 5           | brvl                |
| BRVL        | 02/01/1998 06:02:00        | 02/01/1998 06:17:00        | 02/01/1998 06:45:00        | 0          | 0,002                      | 0,0005           | 45,6        | 02/01/1998 05:29:25        | 02/01/1998 06:05:23        | 1,8         | brvl                |
| BRVL        | 02/01/1998 09:22:00        | 02/01/1998 15:47:00        | 03/01/1998 03:25:00        | 0          | 0,025                      | 0,2455           | 47,6        | 02/01/1998 08:58:37        | 02/01/1998 14:08:16        | 7           | brvl                |
| BRVL        | 03/01/1998 04:19:00        | 03/01/1998 05:32:00        | 03/01/1998 08:10:00        | 0          | 0,002                      | 0,0100           | 56,6        | 03/01/1998 03:12:35        | 03/01/1998 05:53:32        | 4,2         | brvl                |
| BRVL        | 03/01/1998 09:37:00        | 03/01/1998 10:37:00        | 03/01/1998 20:17:00        | 0          | 0,002                      | 0,0309           | 55,4        | 03/01/1998 10:00:23        | 03/01/1998 17:30:08        | 2,8         | brvl                |
| BRVL        | 04/01/1998 01:11:00        | 04/01/1998 01:17:00        | 04/01/1998 01:52:00        | 0          | 0,000                      | 0,0006           | 58,8        | 04/01/1998 00:38:26        | 04/01/1998 00:49:36        | 0,4         | brvl                |
| BRVL        | 04/01/1998 11:07:00        | 04/01/1998 11:22:00        | 04/01/1998 13:52:00        | 0          | 0,005                      | 0,0051           | 55,2        | 04/01/1998 10:37:33        | 04/01/1998 11:12:55        | 4,8         | brvl                |
| BRVL        | 04/01/1998 14:03:00        | 04/01/1998 14:32:00        | 04/01/1998 20:31:00        | 0          | 0,008                      | 0,0796           | 60,6        | 04/01/1998 12:53:41        | 04/01/1998 18:37:25        | 4           | brvl                |
| BRVL        | 04/01/1998 20:31:00        | 05/01/1998 03:02:00        | 05/01/1998 11:21:00        | 0          | 0,075                      | 0,6331           | 62,6        | 04/01/1998 19:17:32        | 05/01/1998 01:37:07        | 9,6         | brvl                |

|             |                            |                            |                            |   |              |               |       |                            |                            |                  |
|-------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---|--------------|---------------|-------|----------------------------|----------------------------|------------------|
| BRVL        | 05/01/1998 11:21:00        | 05/01/1998 12:52:00        | 05/01/1998 14:16:00        | 0 | 0,003        | 0,0177        | 55,0  | 05/01/1998 11:34:20        | 05/01/1998 12:56:35        | 2,8 brvl         |
| <b>BRVL</b> | <b>05/01/1998 14:16:00</b> | <b>05/01/1998 22:12:00</b> | <b>06/01/1998 16:45:00</b> | 1 | <b>0,106</b> | <b>1,1806</b> | 55,0  | <b>05/01/1998 11:34:20</b> | <b>05/01/1998 20:02:49</b> | <b>12,6 brvl</b> |
| BRVL        | 06/01/1998 20:07:00        | 06/01/1998 20:12:00        | 06/01/1998 23:32:00        | 0 | 0,002        | 0,0028        | 67,2  | 06/01/1998 19:29:00        | 06/01/1998 19:51:26        | 1,2 brvl         |
| BRVL        | 06/01/1998 23:32:00        | 07/01/1998 00:17:00        | 07/01/1998 00:42:00        | 0 | 0,001        | 0,0007        | 67,2  | 06/01/1998 19:29:00        | 06/01/1998 19:51:26        | 1,2 brvl         |
| BRVL        | 07/01/1998 08:37:00        | 07/01/1998 20:12:00        | 08/01/1998 07:18:00        | 0 | 0,024        | 0,2330        | 69,4  | 07/01/1998 07:46:41        | 07/01/1998 19:26:45        | 10 brvl          |
| BRVL        | 23/10/1998 08:34:00        | 23/10/1998 09:29:00        | 23/10/1998 11:25:00        | 0 | 0,004        | 0,0059        | 10,6  | 23/10/1998 05:04:41        | 23/10/1998 09:32:05        | 12,4 brvl        |
| BRVL        | 23/10/1998 15:19:00        | 23/10/1998 15:49:00        | 23/10/1998 18:19:00        | 0 | 0,007        | 0,0147        | 24,2  | 23/10/1998 15:22:30        | 23/10/1998 15:53:10        | 7,8 brvl         |
| <b>BRVL</b> | <b>24/10/1998 11:04:00</b> | <b>24/10/1998 18:29:00</b> | <b>25/10/1998 09:32:00</b> | 3 | <b>0,290</b> | <b>2,3474</b> | 28,8  | <b>24/10/1998 08:29:08</b> | <b>24/10/1998 18:03:16</b> | <b>29,2 brvl</b> |
| BRVL        | 25/10/1998 11:04:00        | 25/10/1998 12:09:00        | 25/10/1998 16:50:00        | 0 | 0,008        | 0,0198        | 58,0  | 25/10/1998 09:37:34        | 25/10/1998 12:50:26        | 8,6 brvl         |
| BRVL        | 26/10/1998 02:59:00        | 26/10/1998 03:09:00        | 26/10/1998 04:19:00        | 0 | 0,001        | 0,0002        | 68,2  | 26/10/1998 01:49:04        | 26/10/1998 02:46:37        | 2,2 brvl         |
| BRVL        | 26/10/1998 08:04:00        | 26/10/1998 08:29:00        | 26/10/1998 09:49:00        | 0 | 0,001        | 0,0013        | 70,8  | 26/10/1998 06:38:29        | 26/10/1998 08:11:17        | 2,4 brvl         |
| BRVL        | 26/10/1998 13:44:00        | 26/10/1998 17:49:00        | 27/10/1998 02:44:00        | 0 | 0,022        | 0,1702        | 73,6  | 26/10/1998 13:22:35        | 26/10/1998 14:23:15        | 4,4 brvl         |
| BRVL        | 28/10/1998 18:24:00        | 28/10/1998 23:39:00        | 29/10/1998 14:14:00        | 0 | 0,028        | 0,3376        | 82,4  | 28/10/1998 16:50:28        | 29/10/1998 02:00:58        | 10,4 brvl        |
| <b>BRVL</b> | <b>30/10/1998 01:20:00</b> | <b>30/10/1998 05:44:00</b> | <b>31/10/1998 07:26:00</b> | 2 | <b>0,389</b> | <b>3,0104</b> | 94,4  | <b>29/10/1998 23:08:00</b> | <b>31/10/1998 03:27:31</b> | <b>15,8 brvl</b> |
| <b>BRVL</b> | <b>31/10/1998 07:26:00</b> | <b>31/10/1998 19:42:00</b> | <b>01/11/1998 21:20:00</b> | 3 | <b>0,488</b> | <b>8,9055</b> | 109,6 | <b>31/10/1998 03:51:03</b> | <b>01/11/1998 00:41:51</b> | <b>31,0 brvl</b> |
| BRVL        | 03/11/1998 08:32:00        | 03/11/1998 09:12:00        | 03/11/1998 10:42:00        | 0 | 0,002        | 0,0020        | 93,6  | 03/11/1998 07:58:51        | 03/11/1998 08:55:48        | 2 brvl           |
| BRVL        | 03/11/1998 13:57:00        | 03/11/1998 14:37:00        | 03/11/1998 17:00:00        | 0 | 0,000        | 0,0003        | 97,6  | 03/11/1998 23:51:52        | 04/11/1998 03:55:00        | 9,2 brvl         |
| BRVL        | 04/11/1998 19:35:00        | 04/11/1998 20:02:00        | 04/11/1998 22:12:00        | 0 | 0,003        | 0,0048        | 94,8  | 04/11/1998 19:34:59        | 04/11/1998 19:52:22        | 2,4 brvl         |
| BRVL        | 06/11/1998 06:57:00        | 06/11/1998 07:07:00        | 06/11/1998 08:28:00        | 0 | 0,000        | 0,0001        | 88,2  | 06/11/1998 06:03:35        | 06/11/1998 06:35:28        | 1 brvl           |
| BRVL        | 06/11/1998 15:52:00        | 06/11/1998 16:12:00        | 07/11/1998 02:10:00        | 0 | 0,007        | 0,0351        | 90,2  | 06/11/1998 15:35:24        | 06/11/1998 16:32:53        | 5,4 brvl         |
| BRVL        | 26/12/1998 18:42:00        | 26/12/1998 19:52:00        | 27/12/1998 06:36:00        | 0 | 0,006        | 0,0686        | 18,8  | 26/12/1998 12:48:01        | 26/12/1998 22:17:50        | 8,8 brvl         |
| <b>BRVL</b> | <b>27/12/1998 06:36:00</b> | <b>27/12/1998 09:52:00</b> | <b>28/12/1998 05:10:00</b> | 1 | <b>0,075</b> | <b>1,0262</b> | 28,6  | <b>27/12/1998 02:51:24</b> | <b>27/12/1998 18:43:06</b> | <b>19,2 brvl</b> |
| BRVL        | 28/12/1998 05:57:00        | 28/12/1998 06:37:00        | 28/12/1998 11:06:00        | 0 | 0,004        | 0,0233        | 48,2  | 28/12/1998 02:17:29        | 28/12/1998 02:46:41        | 1,2 brvl         |
| <b>BRVL</b> | <b>16/01/1999 08:52:00</b> | <b>16/01/1999 13:57:00</b> | <b>17/01/1999 03:00:00</b> | 1 | <b>0,101</b> | <b>1,1326</b> | 26,6  | <b>16/01/1999 08:19:07</b> | <b>16/01/1999 17:31:44</b> | <b>13,8 brvl</b> |
| <b>BRVL</b> | <b>26/01/1999 18:32:00</b> | <b>26/01/1999 20:42:00</b> | <b>27/01/1999 05:57:00</b> | 2 | <b>0,238</b> | <b>1,0628</b> | 22,6  | <b>26/01/1999 17:22:35</b> | <b>26/01/1999 19:27:18</b> | <b>9,6 brvl</b>  |
| BRVL        | 03/10/1999 07:27:00        | 03/10/1999 23:27:00        | 04/10/1999 13:30:00        | 2 | 0,009        | 0,2187        | 86,2  | 03/10/1999 04:42:39        | 04/10/1999 05:43:42        | 30,2 brvl        |
| BRVL        | 06/11/1999 02:42:00        | 06/11/1999 02:47:00        | 06/11/1999 03:00:00        | 0 | 0,000        | 0,0000        | 20,4  | 06/11/1999 02:04:25        | 06/11/1999 02:43:38        | 3 brvl           |
| BRVL        | 11/12/1999 17:57:00        | 11/12/1999 19:12:00        | 11/12/1999 21:54:00        | 0 | 0,004        | 0,0141        | 46,6  | 11/12/1999 14:15:11        | 11/12/1999 16:33:30        | 4,4 brvl         |
| BRVL        | 12/12/1999 06:27:00        | 12/12/1999 09:27:00        | 12/12/1999 16:30:00        | 0 | 0,041        | 0,2835        | 59,4  | 12/12/1999 06:23:11        | 12/12/1999 08:50:30        | 5,4 brvl         |
| BRVL        | 13/12/1999 16:22:00        | 13/12/1999 20:22:00        | 14/12/1999 09:27:00        | 0 | 0,069        | 0,6284        | 65,8  | 13/12/1999 13:53:41        | 14/12/1999 05:57:30        | 19,8 brvl        |
| BRVL        | 18/12/1999 02:45:00        | 18/12/1999 07:27:00        | 18/12/1999 14:00:00        | 0 | 0,012        | 0,0968        | 91,0  | 18/12/1999 02:46:11        | 18/12/1999 05:54:20        | 5,2 brvl         |
| <b>BRVL</b> | <b>18/12/1999 20:02:00</b> | <b>19/12/1999 01:47:00</b> | <b>19/12/1999 15:17:00</b> | 3 | <b>0,365</b> | <b>4,7136</b> | 97,8  | <b>18/12/1999 17:58:21</b> | <b>19/12/1999 02:29:30</b> | <b>22,4 brvl</b> |
| BRVL        | 24/12/1999 12:20:00        | 24/12/1999 13:17:00        | 24/12/1999 18:06:00        | 0 | 0,019        | 0,1015        | 49,0  | 24/12/1999 06:32:31        | 24/12/1999 12:38:50        | 12,4 brvl        |

|      |                     |                     |                     |   |       |        |       |                     |                     |              |
|------|---------------------|---------------------|---------------------|---|-------|--------|-------|---------------------|---------------------|--------------|
| BRVL | 24/12/1999 18:06:00 | 24/12/1999 23:37:00 | 25/12/1999 06:36:00 | 3 | 0,722 | 5,3330 | 62,4  | 24/12/1999 17:01:11 | 25/12/1999 00:59:00 | 21,0 brvl    |
| BRVL | 25/12/1999 06:36:00 | 25/12/1999 07:52:00 | 25/12/1999 16:47:00 | 0 | 0,057 | 0,4615 | 84,0  | 25/12/1999 04:08:51 | 25/12/1999 14:32:40 | 2,4 brvl     |
| BRVL | 26/12/1999 03:22:00 | 26/12/1999 06:47:00 | 26/12/1999 14:51:00 | 3 | 0,874 | 8,7221 | 91,2  | 26/12/1999 01:54:21 | 26/12/1999 06:43:10 | 26 brvl      |
| BRVL | 26/12/1999 14:51:00 | 26/12/1999 21:52:00 | 27/12/1999 11:12:00 | 0 | 0,154 | 1,9978 | 117,2 | 26/12/1999 10:34:31 | 26/12/1999 22:26:00 | 13,6 brvl    |
| BRVL | 27/12/1999 17:57:00 | 27/12/1999 22:12:00 | 28/12/1999 08:02:00 | 0 | 0,126 | 1,2216 | 113,8 | 27/12/1999 14:42:01 | 27/12/1999 21:14:00 | 7,8 brvl     |
| BRVL | 30/12/1999 21:57:00 | 30/12/1999 23:17:00 | 31/12/1999 01:27:00 | 0 | 0,001 | 0,0051 | 103,2 | 30/12/1999 20:17:10 | 31/12/1999 03:54:30 | 1,6 brvl     |
| BRVL | 13/04/2000 02:47:00 | 13/04/2000 09:57:00 | 13/04/2000 20:00:00 | 3 | 0,104 | 1,1791 | 25,2  | 13/04/2000 00:28:41 | 13/04/2000 10:01:10 | 35,2 brvl    |
| BRVL | 04/11/2000 08:55:00 | 04/11/2000 10:40:00 | 04/11/2000 13:00:00 | 0 | 0,003 | 0,015  | 48,0  | 04/11/2000 08:00:00 | 04/11/2000 11:00:00 | 4,0 luneray  |
| BRVL | 04/11/2000 14:25:00 | 04/11/2000 14:40:00 | 04/11/2000 15:15:00 | 0 | 0,002 | 0,000  | 52,0  | 04/11/2000 12:00:00 | 04/11/2000 13:00:00 | 1,5 luneray  |
| BRVL | 05/11/2000 22:40:00 | 06/11/2000 01:45:00 | 06/11/2000 12:45:00 | 1 | 0,328 | 2,141  | 75,5  | 05/11/2000 21:00:00 | 06/11/2000 02:00:00 | 14,5 luneray |
| BRVL | 06/11/2000 17:20:00 | 06/11/2000 22:10:00 | 07/11/2000 11:24:00 | 1 | 0,227 | 1,766  | 97,0  | 06/11/2000 17:00:00 | 07/11/2000 05:00:00 | 13,5 luneray |
| BRVL | 07/11/2000 11:24:00 | 07/11/2000 16:50:00 | 08/11/2000 04:29:00 | 0 | 0,047 | 0,851  | 107,0 | 07/11/2000 11:00:00 | 07/11/2000 22:00:00 | 6,5 luneray  |
| BRVL | 08/11/2000 04:29:00 | 08/11/2000 09:45:00 | 08/11/2000 21:50:00 | 2 | 0,299 | 2,446  | 113,5 | 08/11/2000 01:00:00 | 08/11/2000 12:00:00 | 20,0 luneray |
| BRVL | 09/11/2000 03:50:00 | 09/11/2000 09:10:00 | 09/11/2000 16:25:00 | 0 | 0,090 | 0,794  | 132,0 | 09/11/2000 02:00:00 | 09/11/2000 10:00:00 | 11,0 luneray |
| BRVL | 10/11/2000 09:45:00 | 10/11/2000 12:30:00 | 10/11/2000 18:25:00 | 0 | 0,058 | 0,433  | 120,0 | 10/11/2000 09:00:00 | 10/11/2000 11:00:00 | 4,5 luneray  |
| BRVL | 12/11/2000 13:00:00 | 12/11/2000 15:25:00 | 13/11/2000 01:00:00 | 1 | 0,243 | 1,619  | 114,5 | 12/11/2000 10:00:00 | 12/11/2000 15:00:00 | 9,5 luneray  |
| BRVL | 16/11/2000 16:10:00 | 16/11/2000 17:10:00 | 16/11/2000 19:35:00 | 0 | 0,005 | 0,014  | 78,0  | 16/11/2000 15:00:00 | 16/11/2000 16:00:00 | 0,5 luneray  |
| BRVL | 17/11/2000 07:00:00 | 17/11/2000 08:00:00 | 17/11/2000 13:50:00 | 0 | 0,013 | 0,069  | 60,0  | 17/11/2000 05:00:00 | 17/11/2000 11:00:00 | 2,5 luneray  |
| BRVL | 19/11/2000 23:25:00 | 20/11/2000 02:15:00 | 20/11/2000 04:24:00 | 0 | 0,051 | 0,485  | 49,0  | 19/11/2000 22:00:00 | 20/11/2000 02:00:00 | 1,5 luneray  |
| BRVL | 20/11/2000 04:24:00 | 20/11/2000 09:10:00 | 20/11/2000 23:55:00 | 3 | 0,592 | 7,517  | 50,5  | 20/11/2000 02:00:00 | 20/11/2000 11:00:00 | 20,0 luneray |
| BRVL | 23/11/2000 10:35:00 | 23/11/2000 12:25:00 | 23/11/2000 22:50:00 | 0 | 0,102 | 0,684  | 58,0  | 23/11/2000 07:00:00 | 23/11/2000 15:00:00 | 7,0 luneray  |
| BRVL | 24/11/2000 10:20:00 | 24/11/2000 11:50:00 | 24/11/2000 14:45:00 | 0 | 0,013 | 0,059  | 68,0  | 24/11/2000 08:00:00 | 24/11/2000 09:00:00 | 0,5 luneray  |
| BRVL | 25/11/2000 19:45:00 | 25/11/2000 21:20:00 | 26/11/2000 02:45:00 | 0 | 0,104 | 0,360  | 68,5  | 25/11/2000 17:00:00 | 25/11/2000 19:00:00 | 3,0 luneray  |
| BRVL | 26/11/2000 13:20:00 | 26/11/2000 18:15:00 | 26/11/2000 21:25:00 | 0 | 0,007 | 0,062  | 61,5  | 26/11/2000 11:00:00 | 26/11/2000 14:00:00 | 4,0 luneray  |
| BRVL | 27/11/2000 22:55:00 | 27/11/2000 23:55:00 | 28/11/2000 06:25:00 | 0 | 0,101 | 0,568  | 61,5  | 27/11/2000 18:00:00 | 27/11/2000 22:00:00 | 7,5 luneray  |

| site | debut               | max                 | fin                 | classement | Qp spéc<br>[Sruiss^0,8]<br>(m3/s/km2) | LR<br>[Sruiss]<br>(mm) | P[j-9..evt] | début               | fin                 | Pevt | origine de<br>la pluvio |
|------|---------------------|---------------------|---------------------|------------|---------------------------------------|------------------------|-------------|---------------------|---------------------|------|-------------------------|
| BLPC | 12/10/1993 01:09:00 | 12/10/1993 06:41:00 | 12/10/1993 11:51:00 | 0          | 0,237                                 | 2,687                  | 17,8        | 11/10/1993 23:28:29 | 12/10/1993 08:49:22 | 29,0 | blpc                    |
| BLPC | 14/10/1993 03:06:00 | 14/10/1993 07:15:00 | 14/10/1993 13:15:00 | 3          | 0,446                                 | 6,836                  | 52,4        | 14/10/1993 02:34:11 | 14/10/1993 09:18:56 | 28,8 | blpc                    |
| BLPC | 15/10/1993 09:14:00 | 15/10/1993 09:57:00 | 15/10/1993 14:03:00 | 0          | 0,292                                 | 1,725                  | 85,8        | 15/10/1993 08:24:27 | 15/10/1993 10:21:27 | 11,2 | blpc                    |
| BLPC | 15/12/1993 15:23:00 | 15/12/1993 15:54:00 | 15/12/1993 19:11:00 | 2          | 0,003                                 | 0,022                  | 53,6        | 15/12/1993 13:40:06 | 15/12/1993 14:36:57 | 3,4  | blpc                    |
| BLPC | 02/01/1994 00:35:00 | 02/01/1994 04:48:00 | 02/01/1994 08:54:00 | 0          | 0,103                                 | 1,089                  | 48,8        | 01/01/1994 22:12:52 | 02/01/1994 03:34:25 | 7,4  | blpc                    |
| BLPC | 26/10/1994 20:08:00 | 26/10/1994 22:21:00 | 27/10/1994 06:12:00 | 0          | 0,237                                 | 2,315                  | 84,0        | 26/10/1994 19:00:04 | 26/10/1994 23:25:12 | 21,8 | blpc                    |
| BLPC | 27/10/1994 08:55:00 | 27/10/1994 15:15:00 | 27/10/1994 20:48:00 | 2          | 0,020                                 | 0,430                  | 106,2       | 27/10/1994 07:10:00 | 27/10/1994 15:06:00 | 9,0  | blpc                    |
| BLPC | 18/11/1994 08:49:00 | 18/11/1994 12:04:00 | 18/11/1994 19:53:00 | 0          | 0,104                                 | 1,237                  | 38,0        | 18/11/1994 06:26:33 | 18/11/1994 13:01:02 | 16,4 | blpc                    |
| BLPC | 29/12/1994 15:16:00 | 29/12/1994 16:29:00 | 29/12/1994 22:15:00 | 2          | 0,182                                 | 1,932                  | 38,2        | 29/12/1994 13:04:46 | 29/12/1994 16:52:40 | 15,0 | blpc                    |
| BLPC | 31/12/1994 01:52:00 | 31/12/1994 11:15:00 | 01/01/1995 03:45:00 | 0          | 0,084                                 | 2,653                  | 85,8        | 30/12/1994 20:58:00 | 31/12/1994 20:26:00 | 16,2 | hano                    |
| BLPC | 22/01/1995 07:20:00 | 22/01/1995 14:21:00 | 23/01/1995 01:57:00 | 2          | 0,084                                 | 2,106                  | 30,2        | 22/01/1995 06:56:00 | 22/01/1995 20:22:00 | 17,9 | blpc                    |
| BLPC | 24/01/1995 21:23:00 | 25/01/1995 03:01:00 | 25/01/1995 11:28:00 | 3          | 0,084                                 | 1,906                  | 66,1        | 25/01/1995 04:59:00 | 25/01/1995 09:00:00 | 15,3 | blpc                    |
| BLPC | 26/01/1995 01:39:00 | 26/01/1995 12:54:00 | 26/01/1995 21:27:00 | 2          | 0,056                                 | 1,813                  | 65,1        | 26/01/1995 01:49:00 | 26/01/1995 12:25:00 | 16,2 | blpc                    |
| BLPC | 27/01/1995 16:22:00 | 27/01/1995 22:57:00 | 28/01/1995 05:44:00 | 2          | 0,036                                 | 0,633                  | 88,7        | 27/01/1995 13:34:15 | 27/01/1995 21:02:08 | 9,0  | blpc                    |
| BLPC | 28/01/1995 05:44:00 | 29/01/1995 19:25:00 | 30/01/1995 09:34:00 | 3          | 0,016                                 | 0,931                  | 98,7        | 28/01/1995 04:32:05 | 30/01/1995 00:35:10 | 22,4 | blpc                    |
| BLPC | 08/03/1995 20:55:00 | 09/03/1995 05:09:00 | 09/03/1995 16:12:00 | 1          | 0,049                                 | 0,430                  | 63,6        | 08/03/1995 19:18:13 | 09/03/1995 03:34:10 | 4,6  | blpc                    |
| BLPC | 24/04/1995 13:20:00 | 24/04/1995 14:00:00 | 24/04/1995 16:36:00 | 1          | 0,016                                 | 0,047                  | 24,2        | 24/04/1995 09:06:17 | 24/04/1995 12:40:07 | 9,2  | blpc                    |
| BLPC | 12/10/1997 02:08:00 | 12/10/1997 03:20:00 | 12/10/1997 07:12:00 | 0          | 0,195                                 | 1,102                  | 43,4        | 12/10/1997 01:11:49 | 12/10/1997 07:17:56 | 25,0 | blpc                    |
| BLPC | 13/04/2000 02:48:00 | 13/04/2000 08:52:00 | 13/04/2000 12:12:00 | 3          | 0,228                                 | 3,964                  | 27,4        | 13/04/2000 00:29:00 | 13/04/2000 12:13:51 | 36,8 | blpc                    |

| site | debut               | max                 | fin                 | classement | Qp spéc<br>[Sruiss^0,8]<br>(m3/s/km2) | LR<br>[Sruiss]<br>(mm) | P[j-9..evt[ | début               | fin                 | Pevt | origine de<br>la pluvio |
|------|---------------------|---------------------|---------------------|------------|---------------------------------------|------------------------|-------------|---------------------|---------------------|------|-------------------------|
| HANO | 29/12/1994 14:44:00 | 29/12/1994 16:30:00 | 29/12/1994 22:15:00 | 2          | 0,217                                 | 1,653                  | 63,8        | 29/12/1994 12:53:01 | 29/12/1994 17:50:00 | 14,8 | hano                    |
| HANO | 22/01/1995 07:46:00 | 22/01/1995 20:54:00 | 23/01/1995 05:40:00 | 2          | 0,133                                 | 2,295                  | 37,6        | 22/01/1995 04:46:01 | 23/01/1995 01:00:00 | 28,2 | hano                    |
| HANO | 24/01/1995 22:28:00 | 25/01/1995 03:01:00 | 25/01/1995 10:00:00 | 0          | 0,146                                 | 1,789                  | 79,6        | 24/01/1995 19:16:01 | 25/01/1995 05:20:00 | 17,6 | hano                    |
| HANO | 25/01/1995 15:41:00 | 25/01/1995 18:58:00 | 26/01/1995 01:08:00 | 3          | 0,125                                 | 1,432                  | 103,8       | 25/01/1995 15:01:01 | 25/01/1995 19:08:00 | 9,0  | hano                    |
| HANO | 26/01/1995 01:08:00 | 26/01/1995 12:04:00 | 26/01/1995 18:24:00 | 2          | 0,204                                 | 2,801                  | 114,2       | 26/01/1995 00:15:01 | 26/01/1995 12:57:00 | 20,0 | hano                    |
| HANO | 27/01/1995 17:41:00 | 27/01/1995 21:57:00 | 28/01/1995 04:47:00 | 0          | 0,057                                 | 0,551                  | 129,8       | 27/01/1995 14:14:01 | 27/01/1995 18:22:00 | 7,8  | hano                    |
| HANO | 29/01/1995 16:37:00 | 29/01/1995 18:33:00 | 29/01/1995 23:05:00 | 3          | 1,145                                 | 4,066                  | 140,8       | 29/01/1995 15:03:01 | 29/01/1995 18:33:00 | 20,0 | hano                    |
| HANO | 16/02/1995 23:22:00 | 17/02/1995 00:56:00 | 17/02/1995 06:36:00 | 1          | 0,156                                 | 0,773                  | 50,0        | 16/02/1995 20:18:00 | 17/02/1995 01:59:00 | 11,6 | hano                    |
| HANO | 25/02/1995 03:59:00 | 25/02/1995 07:36:00 | 25/02/1995 12:48:00 | 2          | 0,173                                 | 0,973                  | 76,0        | 25/02/1995 02:44:01 | 25/02/1995 07:12:00 | 10,2 | hano                    |
| HANO | 03/03/1995 11:58:00 | 03/03/1995 15:01:00 | 03/03/1995 19:03:00 | 1          | 0,006                                 | 0,058                  | 54,4        | 03/03/1995 10:00:01 | 03/03/1995 15:08:00 | 10,8 | hano                    |
| HANO | 07/03/1995 23:15:00 | 08/03/1995 00:54:00 | 08/03/1995 04:45:00 | 1          | 0,003                                 | 0,015                  | 46,4        | 07/03/1995 19:51:00 | 08/03/1995 01:09:59 | 9    | hano                    |
| HANO | 09/03/1995 00:57:00 | 09/03/1995 02:42:00 | 09/03/1995 05:48:00 | 1          | 0,021                                 | 0,080                  | 59,2        | 08/03/1995 22:41:01 | 09/03/1995 01:34:59 | 5    | hano                    |
| HANO | 24/04/1995 12:38:00 | 24/04/1995 12:51:00 | 24/04/1995 16:46:00 | 1          | 0,008                                 | 0,040                  | 30,4        | 24/04/1995 10:27:01 | 24/04/1995 13:29:00 | 15,8 | hano                    |
| HANO | 05/01/1998 16:00:00 | 05/01/1998 16:30:00 | 06/01/1998 03:48:00 | 1          | 0,003                                 | 0,067                  | 51,8        | 05/01/1998 12:28:00 | 05/01/1998 22:02:59 | 7,6  | hano                    |
| HANO | 16/01/1999 09:28:00 | 16/01/1999 09:58:00 | 16/01/1999 22:55:00 | 1          | 0,010                                 | 0,256                  | 22,8        | 16/01/1999 09:16:00 | 16/01/1999 18:31:00 | 14,2 | hano                    |
| HANO | 10/10/2000 01:59:00 | 10/10/2000 04:54:00 | 10/10/2000 15:19:00 | 1          | 0,086                                 | 0,524                  | 67,0        | 09/10/2000 22:53    | 10/10/2000 12:20    | 21,6 | blpc                    |

## Annexe 6 : analyse des événements qui ne remplissent pas les conditions de fort ruissellement sur les sites de l'Aréas

Ce chapitre poursuit l'analyse des données de l'AREAS du paragraphe 8 du rapport. Il tente un retour critique sur les événements qui correspondent à des « fausses alertes », c'est-à-dire aux événements de la zone orangée de la Figure 2 dont la lame ruisselée est inférieure à 3 mm, ainsi qu'aux « événements majeurs non prévus », c'est-à-dire les événements de lame ruisselée supérieure à 3 mm mais hors des conditions données.

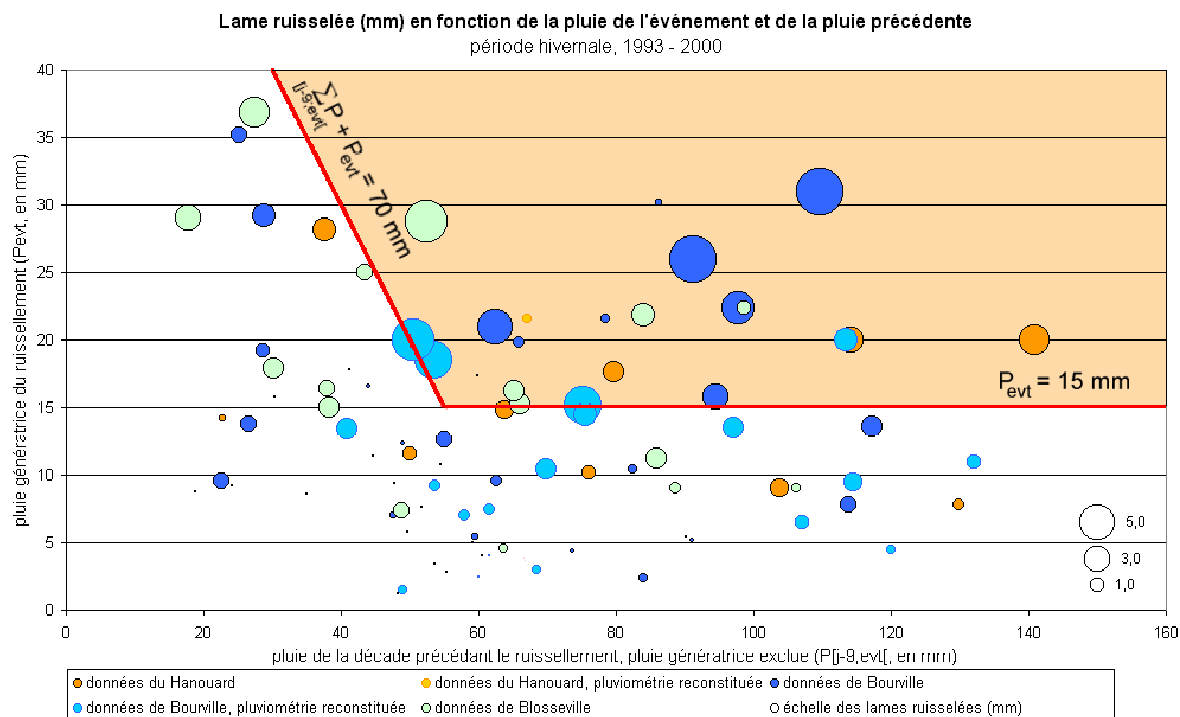


Figure 2 : lame ruisselée en fonction de la pluie génératrice et de la pluie de la décade précédente, tous les points disponibles sur les périodes hivernales entre janvier 1993 et décembre 2000, la zone des conditions  $\sum_{[j-9;evt]} P + P_{evt} \geq 70 \text{ mm}$  et  $P_{evt} \geq 15 \text{ mm}$  est représentée en orangé.

Les événements ruisselants mineurs qui remplissent les mêmes conditions climatiques que les événements majeurs sont au nombre de 9, si on exclu ceux survenus lors des périodes de transition (octobre et mars-avril). Parmi ces événements, il faut distinguer ceux de Bourville des autres : nous avons vu lors de la présentation de ces sites<sup>1</sup> que les particularités des sites de Blosseville et du Hanouard sont très marquées, ce qui rend leur analyse détaillée plus délicate. Il nous faut détailler ce point.

Le seul cas de lame ruisselée supérieure à 3 mm hors des conditions  $\left( \sum_{[j-9;evt]} P \geq 70 \text{ mm}, P_{evt} \geq 15 \text{ mm} \right)$  a été enregistré à Blosseville le 13 avril 2000. Il sera étudié en détail.

### les « fausses alertes » de Blosseville et du Hanouard

Sur les sites de Blosseville et du Hanouard, les événements de lame ruisselée inférieure à 3 mm se trouvent tous entre décembre 1994 et janvier 1995, et cinq sur six se sont produits lors des graves inondations de la fin janvier 1995 (Tableau 1).

<sup>1</sup> Erreur ! Source du renvoi introuvable. page Erreur ! Signet non défini. dans le document principal

Tableau 1 : événements ruisselants mineurs de Blossesville et du Hanouard remplissant les conditions des événements ruisselants majeurs hors périodes de transition

| site         | $\sum_{[j-9;evr[} P$ | $P_{evr}$ | $LR_{pr}$ | date       |
|--------------|----------------------|-----------|-----------|------------|
| le Hanouard  | 63,8                 | 14,8      | 1,65      | 29/12/1994 |
| le Hanouard  | 79,6                 | 17,6      | 1,79      | 24/01/1995 |
| le Hanouard  | 114,2                | 20,0      | 2,80      | 26/01/1995 |
| Blossesville | 66,1                 | 15,3      | 1,91      | 24/01/1995 |
| Blossesville | 65,1                 | 16,2      | 1,81      | 26/01/1995 |
| Blossesville | 98,7                 | 22,4      | 0,93      | 27/01/1995 |

Détaillons les particularités de ces deux sites pour revenir sur ces enregistrements.

## Blossesville

Comme rappelé précédemment, le site de mesure de Blossesville est implanté sur un bassin versant entièrement agricole, sans la moindre surface construite, où les terres labourées représentaient la totalité de la surface totale en 1994 (environ 98% aujourd'hui), le tout sur des limons très battants. Le nombre de parcelles n'y est pas très élevé : 23 au cours de cet hiver 2002-2003. On mesure donc ici les phénomènes de ruissellement à une échelle immédiatement supérieure à celle de la parcelle agricole.

La petitesse de ce bassin versant a des conséquences sur les réponses aux précipitations auxquelles il est soumis :

- d'une année à l'autre, la part de chaque culture sur cette surface oscille fortement autour de sa valeur moyenne : la surface potentiellement ruisselante sera donc significativement différente d'une année à l'autre pour une même période, particulièrement au cours des périodes de transition d'octobre et de mars-avril ;
- les talwegs étant courts, ils traversent un petit nombre de parcelles : à occupation du sol égale, la répartition géographique des différentes cultures influera donc sur la réponse du bassin versant (effet patchwork) ;
- il n'y a aucune possibilité de réinfiltration le long des différents chemins d'écoulement.

Les données de ruissellement obtenues sur ce site ont donc une variabilité inter-annuelle certaine. Dans ces conditions, il n'est pas très étonnant d'avoir un certain nombre de « fausses alertes » à l'analyse des enregistrements de ce sites en considérant des conditions qui se veulent valables sur tout le Pays deCaux.

Le ruissellement du 27 janvier, le plus faibles des ruissellements du Tableau 1, a une autre explication que la variabilité inter-annuelle. Le découpage en *ruissellements élémentaires* a donné pour cette période un ruissellement continu de 52 heures, dont le débit de pointe instantané spécifique n'excède pas  $16 L.s^{-1}.km^{-2}$  : c'est un ruissellement très faible mais continu pendant plus de deux jours, qui fait donc échec au lien entre lame ruisselée et débit de pointe. Sur une si longue durée, il n'est pas étonnant d'obtenir une pluie génératrice du ruissellement supérieure à 15 mm. Sur les bassins versants plus grands, ce ruissellement a par moment cessé, infiltré le long du talweg, ventilant les pluies génératrices sur autant de ruissellements élémentaires, et aucune de ces  $P_{evr}$  n'est supérieure à 15 mm. Ce ruissellement est donc typique de Blossesville et des petits bassins versants sans zone de réinfiltration. Il est difficilement généralisable au fonctionnement des bassins versants plus grands. Cet événement est donc à la limite d'avoir sa place parmi ceux qui répondent aux conditions

$$\sum_{[j-9;evr[} P \geq 70 \text{ mm} \text{ et } P_{evr} \geq 15 \text{ mm}.$$

## le Hanouard

Le bassin versant équipé au Hanouard est un bassin de rebord de plateau, transition entre le plateau loessique battant et la vallée de la Durdent. La pente y est supérieure à ce qu'elle est ailleurs, ce qui influe beaucoup sur l'exploitation des surfaces par l'homme : les pentes les plus fortes sont en bois ou en prairie, et ne participent pas à la production de ruissellement<sup>2</sup>. Néanmoins, l'utilisation de la lame ruisselée par la surface potentiellement ruisselante  $LR_{pr}$  tient compte de cette particularité.

Pourtant, si l'on compare les valeurs de lames ruisselées présentes dans le tableau de synthèse, on constate que les ruissellements sont toujours plus forts à Bourville qu'au Hanouard. Ce fait est difficile à expliquer, mais nous pouvons proposer différents éléments de réponse.

Bien que les surfaces en prairie (27,4 %) et en bois (12,2 %) du bassin versant soient prises en compte par la grandeur  $LR_{pr}$ , leur localisation sur l'essentiel des fonds de talweg favorise l'infiltration des ruissellements. En particulier, entre la ferme de la Métairie et la RD 109, le talweg est occupé par une jeune futaie régulière, et on sait que la capacité d'infiltration d'un bois est encore supérieure à celle d'une prairie.

De plus, les engouffrements karstiques ne sont pas négligeables : à l'amont immédiat de ce bois, le ruissellement est dirigé vers une béttoire au milieu d'une prairie, et à son aval, un chenal dirige l'essentiel de l'écoulement vers une ancienne carrière présentant en son fond une large béttoire.

Enfin, depuis 1996, le bassin versant est équipé de deux retenues d'une capacité totale de 3300 m<sup>3</sup>. Ramené à la surface potentiellement ruisselante du bassin versant, cela équivaut à une capacité de 2 mm.

Le but d'un bassin de retenue n'est pas d'infiltrer les écoulements sur place, mais de faire baisser leur débit de pointe et de les ralentir. Les écoulements du débit de fuite à l'exutoire du bassin versant se faisant sur des fonds de talweg occupés par des prairies, des bois, et présentant des béttoires, à pluie génératrice égale, l'existence de ces bassins de retenue a pour effet d'augmenter la part des eaux de ruissellement réinfiltrées avant l'exutoire.

Bien qu'une partie des talwegs de Bourville soient aussi en prairie, et que des points d'engouffrements karstiques y soient aussi présents, la topographie et la présence de bois en fond de talweg, propre au bassin versant du Hanouard, semblent expliquer cette différence entre les deux bassins versants.

Etant donné ces particularités locales, à conditions météorologiques équivalentes, il n'est pas étonnant d'observer des lames ruisselées plus faibles, même en tenant compte de la surface potentiellement ruisselante. Néanmoins, à défaut d'être *importants* selon le seuil établi à 3 mm de lame ruisselée, ces événements sont significatifs (plus de 1,5 mm).

---

<sup>2</sup> Dans certains cas exceptionnels, néanmoins, on a pu observer des prairies ou des bois être source de ruissellement.

## les « fausses alertes » de Bourville

Le Tableau 2 rappelle les événements qui restent à expliquer.

Tableau 2 : événements ruisselants mineurs de Bourville remplissant les conditions des événements ruisselants majeurs hors période de transition (une astérisque marque les événements dont la pluviométrie est reconstituée)

| site       | $\sum_{[j-9;evt[} P$ | $P_{evt}$ | $LR_{pr}$ | date       |
|------------|----------------------|-----------|-----------|------------|
| Bourville  | 65,8                 | 19,8      | 0,63      | 13/12/1999 |
| Bourville* | 75,5                 | 14,5      | 2,14      | 05/11/2000 |
| Bourville* | 113,5                | 20,0      | 2,45      | 08/11/2000 |

La topographie et la pédologie de ce bassin versant, et, par voie de conséquence, son agriculture, en font un site bien représentatif du Pays de Caux pour les phénomènes de ruissellements :

- l'occupation du sol est proche de celle de l'ensemble du territoire du syndicat de bassin versant Dun-Veules ;
- les zones urbanisées sont uniquement à la périphérie du bassin versant ;
- sa taille de 1100 ha nous garantit une occupation du sol stable d'une année à l'autre ;
- et les *effets patchwork* ne sont pas sensibles.

Ce site est donc particulièrement adapté à l'étude du lien entre pluviométrie et ruissellement pour des surfaces de plusieurs kilomètres carrés.

L'événement du 13 décembre 1999, avec sa lame ruisselée à peine supérieure à 0,5 mm en réponse à une pluie génératrice de près de 20 mm, alors que le cumul sur la décade est à plus de 65 mm lorsque commence la pluie génératrice, n'est pas explicable. C'est un cas avéré d'événement ruisselant répondant aux conditions des événements majeurs et qui n'en est pas un.

Concernant l'événement du 5 novembre 2000, il ne remplit pas strictement les conditions  $\sum_{[j-9;evt[} P \geq 70 \text{ mm}$  et  $P_{evt} \geq 15 \text{ mm}$  : sa pluie génératrice n'est que de 14,5 mm. Mais

surtout, la pluviométrie de ce mois de novembre 2000 a été reconstituée à partir des données fournies par le pluviomètre du *Service régional de protection des végétaux* (SRPV) de Luneray. Le poste n'est pas situé très loin du bassin versant de Bourville, on peut donc considérer ses précipitations comme équivalentes à celle de Bourville, mais la précision à laquelle ces données sont fournies est le pas de temps horaire. Cette faible précision nous a probablement amené à ajouter dans la pluie génératrice du ruissellement des précipitations qui n'en faisaient pas partie.

Quant à l'événement du 8 novembre 2000, bien que sa pluviométrie soit reconstituée dans les mêmes conditions que l'événement précédant, il ne fait aucun doute que les conditions des ruissellements majeurs ont été largement dépassées.

Pour expliquer ces événements des 5 et 8 novembre 2000, il suffit de reprendre l'historique des pluies de cette année depuis le début du mois d'octobre. Ce mois d'octobre 2000 a été très pluvieux : 193 mm enregistrés à Luneray par le SRPV. Si les orges ont pu être semées fin septembre, la succession de pluies importantes a empêché les agriculteurs de semer les blés au cours de la première quinzaine d'octobre. Les seules fenêtres temporelles possibles pour ces semis avant les gros ruissellements des 5 et 8 novembre furent la journée du 14 octobre et la période du 24 au 27 octobre. L'état des surfaces de sols étaient donc moins dégradé qu'au cours d'une année moyenne. On se trouvait donc en ce début novembre avec des états de surface plus généralement rencontrés au cours d'un mois d'octobre, ces deux événements peuvent donc être ramenés à des cas survenus au cours de la période de transition du mois d'octobre.

## **l'événement « non prévu » du 13 avril 2000**

Les ruissellements du 13 avril 2000 ont été enregistrés à Bourville et à Blosseville. Le Tableau 3 donne leurs principales caractéristiques :

*Tableau 3 : événements ruisselants du 13 avril 2000*

| site        | $\sum_{[j-9;evr]} P$ | $P_{evt}$ | $LR_{pr}$ | $\sum_{[j-9;evr]} P$ |
|-------------|----------------------|-----------|-----------|----------------------|
| Blosseville | 27,4                 | 36,8      | 3,96      | 64,2                 |
| Bourville   | 25,2                 | 35,2      | 1,18      | 60,4                 |

Les conditions climatiques étaient très semblables sur les deux sites. Bien que la pluie de l'événement ait été très importante<sup>3</sup>, la condition  $\sum_{[j-9;evr]} P \geq 70 \text{ mm}$  n'est pas atteinte, ni la condition  $\sum_{[j-9;evr]} P \geq 50 \text{ mm}$ . La lame ruisselée à Blosseville est supérieure à 3 mm.

La Figure 3 présente les hydrogrammes des deux sites, exprimés en débits spécifiques, avec leur hyétogramme.

Les deux hyétogrammes sont très semblables, et les intensités peu élevées, hormis un pic supérieur à  $10 \text{ mm.h}^{-1}$  vers 3 heures du matin. Il s'agit donc bien d'une pluie de type hivernal. La réponse du bassin de Blosseville est proportionnellement beaucoup plus forte que celle du bassin versant de Bourville.

---

<sup>3</sup> de l'ordre de la vingtennale : Météo France a calculé pour la station de Rouen-Boos, avec un ajustement de la loi exponentielle simple, à partir des données d'octobre à mars de la période 1968/1988, que la hauteur de précipitations sur 12 heures (seuil à 20,9 mm) de fréquence de retour 20 ans est 36,0 mm (I.C. à 70 % : 28,7 – 43,2)

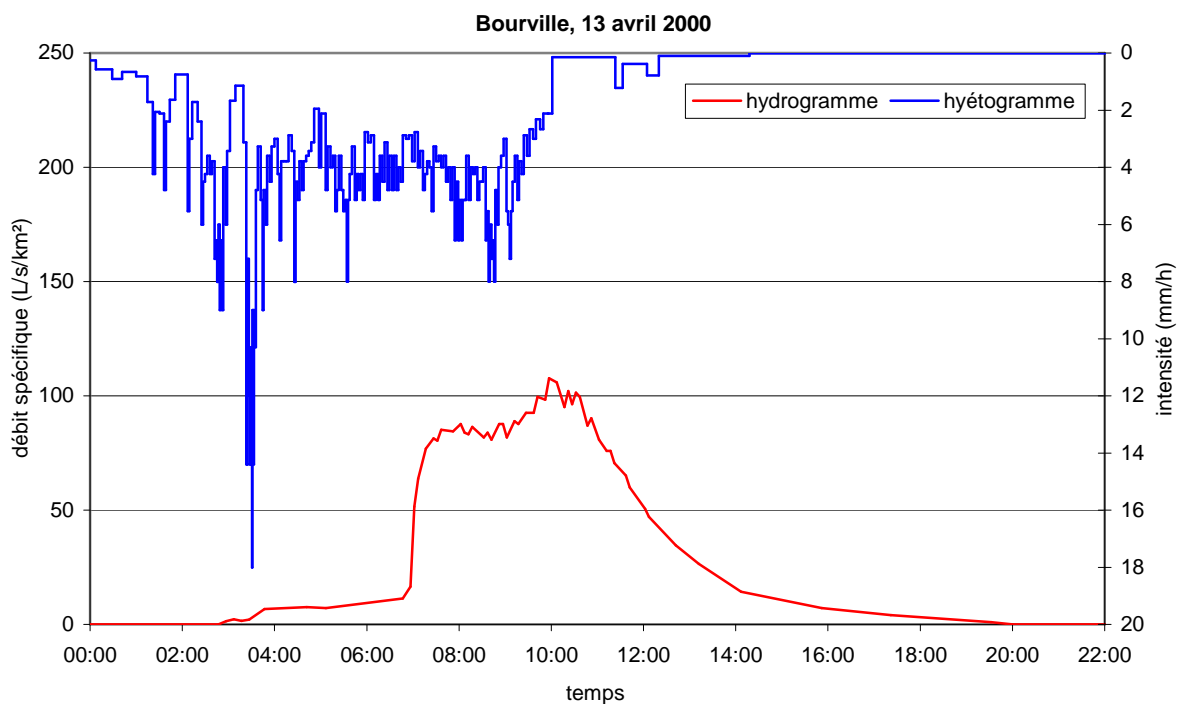
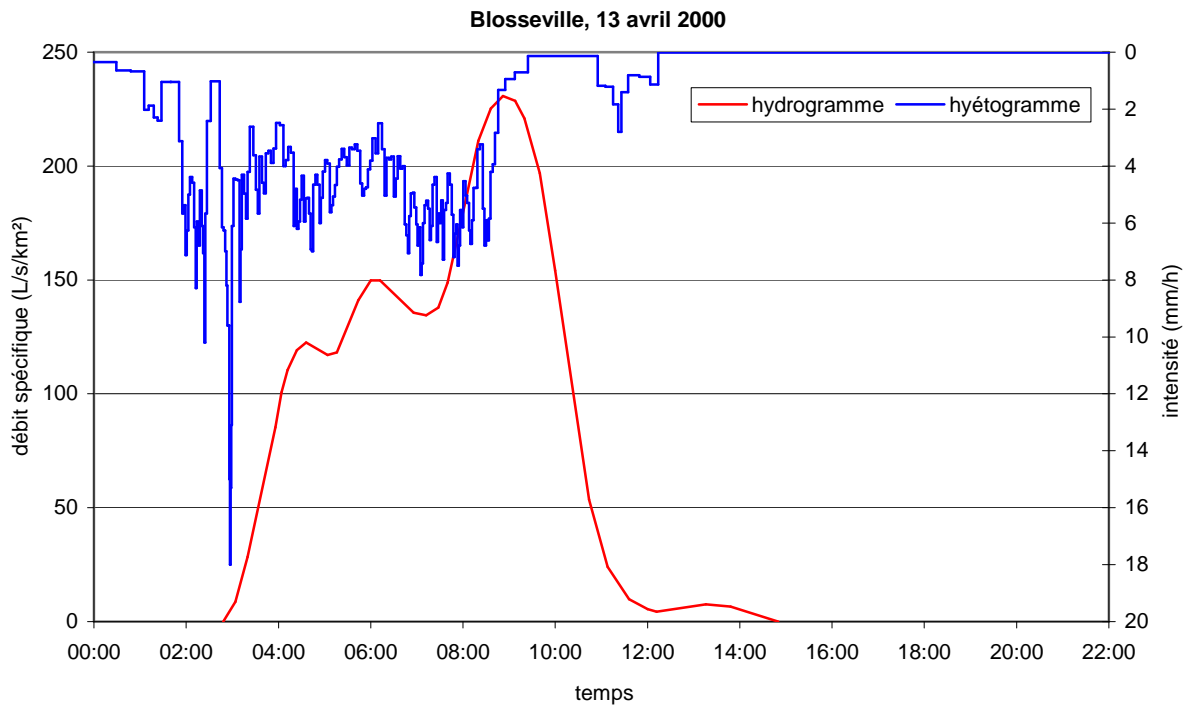


Figure 3 : événements ruisselants du 13 avril 2000 à Blosseville et Bourville

Pour expliquer cela, compte-tenu des caractéristiques de ces deux bassins versants, nous avons été chercher l'occupation du sol de ce début de printemps et l'historique des précipitations des mois de mars et avril.

La pluviométrie montre une fenêtre de 19 jours, entre le 4 et le 22 mars, au cours de laquelle il n'est tombé que 3 mm de pluie le 13 mars. Tous les semis d'orge de printemps, de lin et de pois ont donc pu être faits dans de bonnes conditions. Puis, entre le 4 mars et le 11 avril, il n'est tombé que 60 mm, quantité d'eau insuffisante pour voir se développer une croûte de battance sur les cultures de printemps. Dans l'intervalle, une autre fenêtre sans pluie entre le 8 et le 10 avril a dû permettre aux premiers champs de betterave d'être semés. Ceux qui ne l'auront pas été avant le 12 avril ont tout au moins été déchaumés peu avant cette date. Étant donné les intensités pluvieuses enregistrées, aucune de ces cultures de printemps n'a pu ruisseler : la surface potentiellement ruisselante, pour ce type de précipitations, est donc

constituée des seules parcelles de culture d'hiver qui n'ont pas été retravaillées depuis l'automne.

Or cette année là, les céréales d'hiver (blé et escourgeon) représentaient plus de 57 % de la surface du bassin versant. En y ajoutant les chantiers de récoltes non encore retravaillés, on arrive à un total de 59 % de la surface qui présentait une croûte de battance développée. Le 12 avril 2000, au début de la pluie génératrice, la surface potentiellement ruisselante représentait donc 59 % de la surface totale du bassin versant. Cette valeur est faible comparée aux presque 100 % de surfaces potentiellement ruisselantes admis hors périodes de transition.

Cependant, pour un mois d'avril, elle est supérieure à la moyenne, qui est d'environ 50 % de céréales. Mais c'est surtout la répartition géographique de ces céréales qui est remarquable. Elles sont présentes sur la quasi totalité du talweg nord du bassin. Il n'y avait donc à ce moment là aucun *effet patchwork* pour ralentir les écoulements et favoriser leur infiltration sur des cultures de printemps, toute la partie nord du bassin versant a donc pu ruisseler.

A Bourville, l'état de surface des sols de chaque type de culture était le même qu'à Blosseville. Par contre, la proportion de céréales d'hiver étant plus faible, le ruissellement fut moindre. Le ruissellement étant moindre, le débit de pointe le fut également. Ainsi, l'infiltration sur les surfaces en herbes et les engouffrements karstiques ont proportionnellement eu un effet plus grand.

Ce cas particulier illustre bien l'effet « année » sur le site de Blosseville.

Cet événement du 13 avril 2000 à Blosseville, on l'a vu, est le seul événement dont la lame ruisselée est supérieure à 3 mm et qui ne satisfasse pas les conditions climatiques que partagent les autres ruissellements importants. Ceci dit, pour ces deux sites, les conditions météorologiques de cet événement sont proches de remplir la condition  $\sum_{[j-9;evt]} P \geq 70 \text{ mm}$

(Tableau 3). Ceci plaide en faveur de cette condition plutôt que de la condition  $\sum_{[j-9;evt]} P \geq 50 \text{ mm}$ .

**Ce cas particulier étant ainsi expliqué, on peut affirmer que pour les surfaces de plusieurs kilomètres carrés, toutes les lames ruisselées importantes se produisent lorsque les conditions**

$$\begin{cases} \sum_{[j-9;evt]} P + P_{evt} \geq 70 \text{ mm} \\ P_{evt} \geq 15 \text{ mm} \end{cases}$$

**sont réunies.**

## occupation du sol sur le bassin versant de Blossesville au 12/04/2000

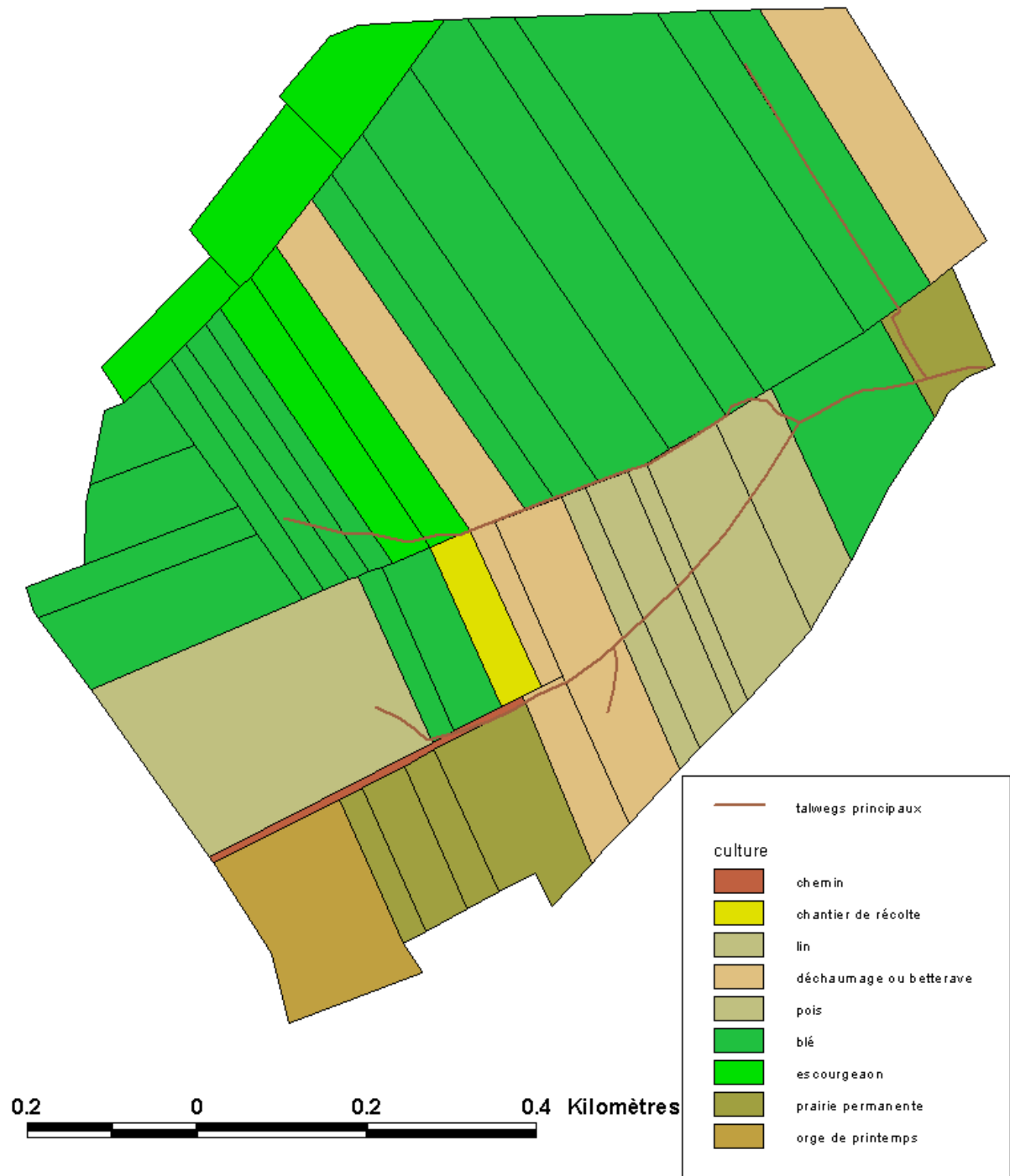


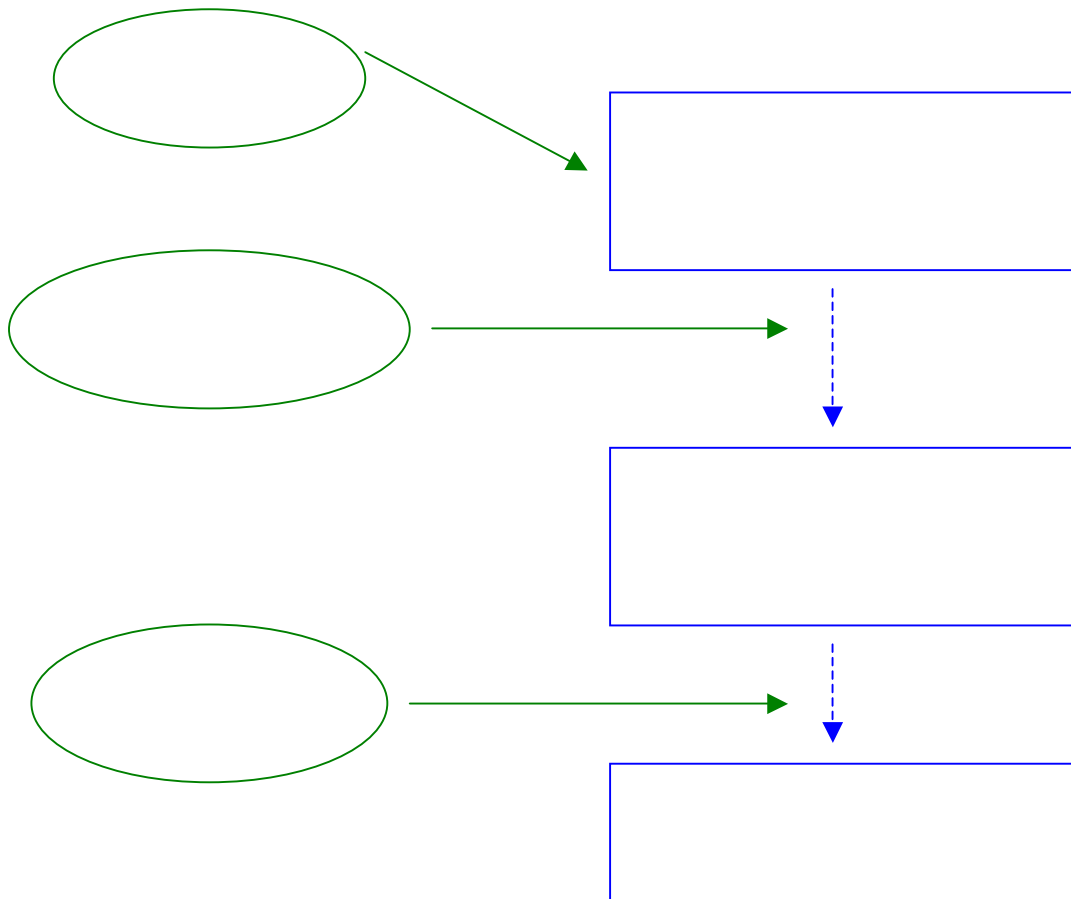
Figure 4 : occupation du sol du bassin versant de Blossesville au 12 avril 2000, déduite à partir du relevé de l'occupation du sol effectué le 15/05/2000 (source : INRA) et des précipitations des mois de mars et d'avril

## Annexe 7 : quelques éléments sur la prévision des précipitations

Le temps observé à un instant et en un lieu donné vont largement dépendre des conditions observées dans un certain voisinage et aux instants antérieurs. Ainsi, en observant les conditions météorologiques de façon systématique à un instant donné sur un large domaine, peut-on espérer, en connaissant ou en « devinant » leurs lois d'évolution, prévoir leur comportement futur. Pour cela, le recours à des calculs numériques est indispensable. C'est la principe de base des modèles de prévision météorologiques, dont les

Les différentes phases de la prévision numérique sont présentées ci-contre de manière schématique :

Les différentes phases de la prévision :

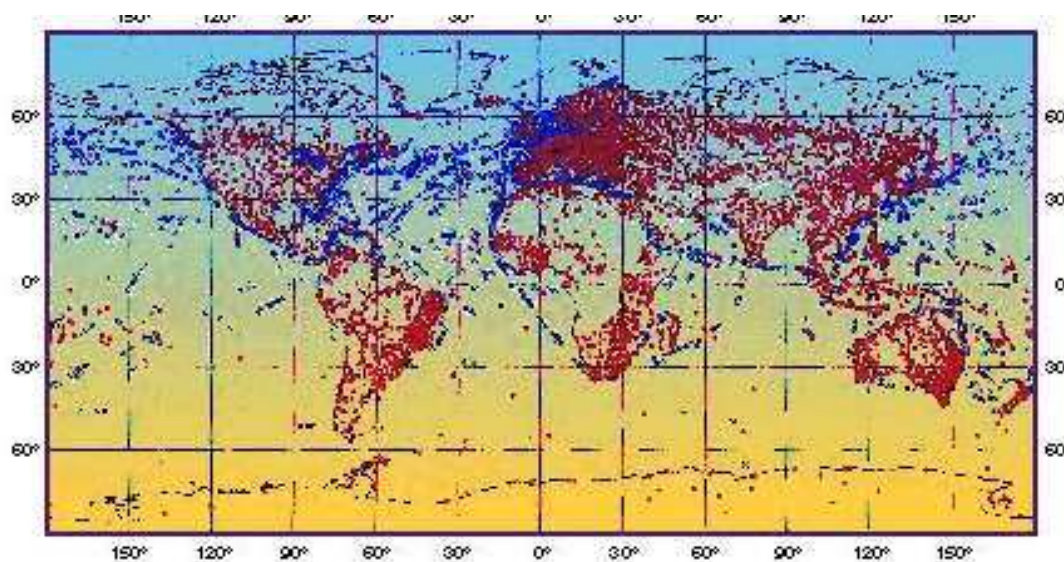


On distingue donc 3 phases successives, que nous allons maintenant décrire.

### **Première phase : l'observation**

La première phase est celle de l'observation des conditions météorologiques. Comme on l'a vu, il est nécessaire de choisir un domaine d'observation plus étendu que le domaine sur lequel on veut effectuer la prévision, et il est intuitif de considérer qu'il doit l'être d'autant plus que l'échéance de prévision est importante. Il est progressivement apparu que l'hémisphère, puis la sphère terrestre entière constituaient le domaine d'observation pertinent pour les modèles (cela évite entre autres de gérer de délicats problèmes de conditions aux limites « latérales »).

Néanmoins, la première difficulté réside dans une répartition très inégale de ces observations à la surface de la terre (voir figure ci-dessous), tout d'abord à cause de la présence des océans, et pour les zones émergées, d'une densité relativement liée au développement économique.



*répartition des observations à la surface de la terre (source OMM)*

**Ainsi, d'importantes zones de la planète sont de véritables « déserts » pour l'observation des conditions météorologiques, parfois sur des zones sensibles.**

Pour pallier ces insuffisances, on a recours à des mesures de type satellital, qui permettent, pour les satellites dits géostationnaires comme Météosat, d'observer une partie importante du globe presque en continuité temporelle. On peut utiliser également des données issues des avions, des bouées dérivantes ou des navires commerciaux. Pour les observations en altitude, la mesure par ballons-sondes reste incontournable, même si elle n'est plus exclusive.

Pour que l'ensemble des données nécessaires à la modélisation puisse être disponible en temps réel, il est nécessaire d'établir à la fois un système de télécommunication et la coopération de l'ensemble des pays concernés. Ce réseau international, baptisé « veille météorologique mondiale » et placé sous l'égide de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), permet un accès synchronisé et gratuit à l'ensemble de ces données. Il s'agit d'un exemple rare (peut-être unique ?) de coopération internationale complète et constante depuis un demi-siècle.

Ces observations sont donc irrégulières dans l'espace, et dans le temps pour certaines d'entre elles. Par ailleurs, elles sont bien évidemment sujettes à des erreurs de mesure, qui peuvent se propager très rapidement dans le modèle. Enfin, certaines observations ne sont pas

directement exprimables en termes de paramètres physiques « primaires » utilisés dans les modèles. Des actions de contrôle sont donc nécessaires, à l'issue desquelles on dispose enfin d'une traduction de la situation météorologique observée par le modèle à  $t_0$ , dans son référentiel spatial, et qu'on appelle « analyse ».

Ce référentiel est souvent une « grille » dont la maille est régulière horizontalement, et irrégulière verticalement, sur laquelle est calculée la valeur moyenne des paramètres primaires.

## ***Deuxième phase : les équations d'évolution***

Pour envisager l'évolution future des paramètres de base, il suffit théoriquement de satisfaire les principes généraux appliqués à un fluide stratifié en rotation :

- la conservation de la masse
- la conservation de la quantité de mouvement
- la conservation de l'énergie totale

Les équations correspondantes, qui traduisent mathématiquement ces principes, sont :

- l'équation de continuité
- l'équation du mouvement
- l'équation de la thermodynamique

Elles s'appliquent au champ de vent, de pression, de température et de densité  $\rho$  (ou à d'autres variables composées à partir des précédentes). Ces équations très générales ne présentent pas de solutions analytiques exactes, et doivent être résolues numériquement. Même dans ce cas, le temps de calcul nécessaire ou la stabilité de la prévision imposent de formuler des hypothèses simplificatrices, plus ou moins fortes selon la vocation du modèle.

De façon générale, un compromis doit être recherché entre le coût de calcul, qui s'exprime par la puissance ou la durée nécessaires à la prévision, et la recherche de solutions numériquement stables.

En effet, parmi les questions à prendre en compte figurent :

- les phénomènes radiatifs : le système radiatif soleil-terre-atmosphère, est un système complexe, où chacun de ces composants joue un rôle important dans diverses longueurs d'onde.
- les phénomènes de couche limite : l'atmosphère est un fluide en rotation autour de la terre, et des phénomènes de couche limite apparaissent, aussi bien sur le plan dynamique (frottements) que thermiques (puisque le sol peut être source ou puits de chaleur sensible ou latente), se traduisant par exemple par des flux turbulents verticaux, transportant à la fois de l'énergie et de la vapeur d'eau.
- La convection profonde, génératrice des phénomènes orageux.
- le relief, qui sera décrit sur la maille du modèle. Sachant que le relief est un puissant modulateur des conditions météorologiques (et notamment des précipitations), ceci mesure l'importance de la résolution spatiale.
- La nature géologique du sol,
- Le couvert végétal du sol. Ces deux derniers facteurs jouant un rôle primordial pour le cycle de l'eau, en particulier les phénomènes d'évapotranspiration.

Muni de tous ces éléments, le modèle va pouvoir se dérouler, et prévoir l'évolution des variables de base aux divers pas de temps postérieurs à  $t_0$  et sur sa grille.

### **3<sup>ème</sup> phase : la prévision finale**

On dispose maintenant de la prévision des variables du modèle aux points de grille à un instant ultérieur  $t$ . Néanmoins, cela ne suffit généralement pas pour satisfaire les besoins généraux de prévision, et pour les raisons suivantes :

- ce n'est pas forcément au point de grille du modèle qu'on souhaite disposer de la prévision, mais par exemple sur une surface complexe (précipitations sur un bassin-versant).
- Les prévisions correspondent à des moyennes sur la grille du modèle, laquelle dans les modèles opérationnels reste au mieux de 10 à 30 km de côté selon le cas. Or, certains paramètres varient beaucoup sur cette surface (la température ou les précipitations en région de relief par exemple). Une forme d'adaptation locale est alors nécessaire. On peut par exemple mettre en œuvre des méthodes statistiques comme des régressions multiples entre le paramètre à calculer et ceux du modèle.
- Enfin, le modèle ne fournit pas de prévision « parfaite ». Néanmoins, certaines erreurs peuvent se révéler répétitives dans certaines conditions. Un expert prévisionniste pourra les détecter, et modifier en conséquence les valeurs prévues. **On appellera supervision, dans la suite du document, la modification des sorties brutes du modèle par le prévisionniste.** Cette modification peut d'ailleurs compléter une adaptation statistique.

### **La notion de prévisibilité**

Les développements précédents laissent apparaître au moins 3 phases susceptibles d'engendrer des erreurs de prévision :

- Une mauvaise description de l'état initial de l'atmosphère à  $t_0$ .
- Les diverses erreurs et instabilités introduites par la modélisation numérique
- La description insuffisante des phénomènes physiques sous-maille.

Les progrès constants des algorithmes numériques et l'accroissement de puissance des ordinateurs ont permis de progresser de façon continue depuis le début de la modélisation numérique, et ne représentent sans doute plus le maillon le plus faible de la chaîne.

En revanche, les paramétrisations physiques demeurent encore le plus souvent très simplificatrices. Même lorsque les connaissances scientifiques s'améliorent, il reste difficile de les introduire de manière opérationnelle dans les modèles. Par exemple, les mécanismes physiques de formation des précipitations sont encore mal représentés, car impliquant un ensemble de facteurs complexes et d'échelle spatiale et temporelle très inférieure à la maille des modèles.

On peut y voir là une des limitations spécifiques à la prévisibilité des précipitations.

Il demeure donc utile de chercher à estimer quelle est la prévisibilité atteinte par les modèles actuels, et plus généralement quelles sont leurs performances à une échéance donnée. Pour cela il convient d'abord de réfléchir aux critères à appliquer.

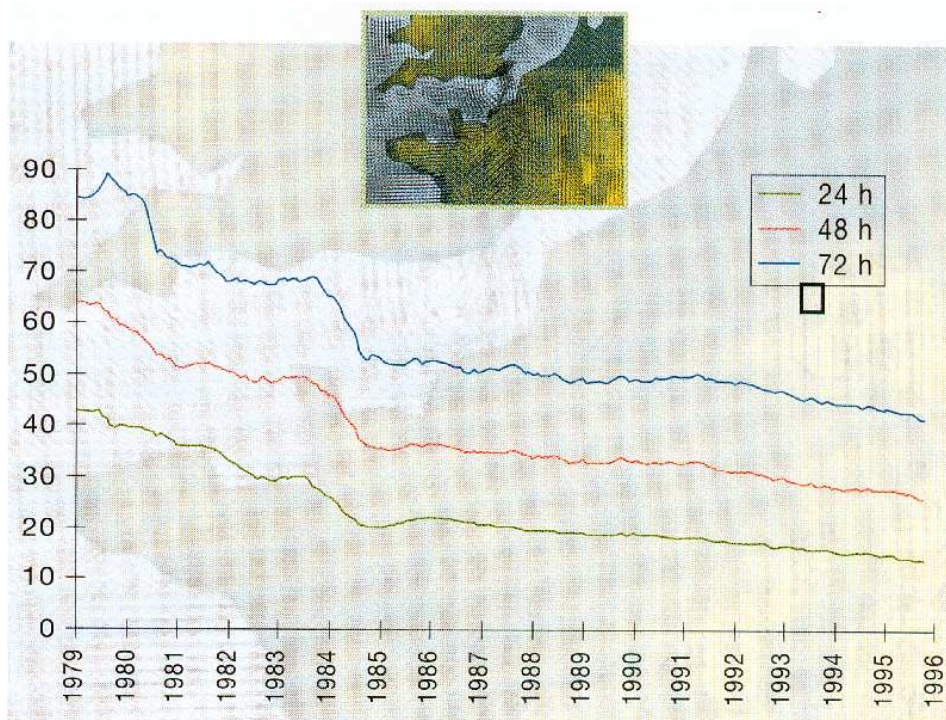
## Critères de qualité de la prévision

De façon générale, on peut considérer que deux types de critères sont utilisés :

- **des critères « intrinsèques »** aux modèles, où l'on cherche à évaluer comment ceux-ci réalisent les deux 1ères phases décrites plus haut (« analyse » de l'observation, et équations d'évolution), la 3<sup>ème</sup> phase pouvant en effet être considérée comme résultant de méthodes ou d'adaptations extérieures au modèle proprement dit. On prend alors comme paramètre les champs observés sur une grille d'un certain domaine à un instant donné, qui sont comparés aux valeurs prévues à ce même instant. Cette approche a notamment pour intérêt de pouvoir faciliter les comparaisons entre les modèles, puisque tous ces modèles calculent ce type de champ. Ainsi, régulièrement, l'OMM publie des comparaisons de ce type.

A titre d'exemple synthétique, la figure ci-dessous représente l'évolution des performances du modèle opérationnel de Météo-France au cours du temps et selon diverses échéances. Le domaine spatial sur lequel porte l'évaluation est représenté en médaillon.

On constate d'une part que la performance se dégrade avec l'échéance de la prévision, et d'autre part que le progrès est continu (mais pas forcément régulier) au cours du temps. Sur ce critère, la performance de la prévision à 3 jours en 1996 atteint celle de la prévision à 1 jour de 1979.



évolution temporelle de la qualité de la prévision à diverses échéances (source Météo-France)

- **des critères plus classiques**, qui permettent une comparaison entre les valeurs observées et les valeurs prévues, comme la température, la nébulosité, la hauteur de précipitations, etc... (ces paramètres sont d'ailleurs souvent appelés par les météorologistes « temps sensible », par opposition aux champs primaires du modèle). Dans ce cas, ce sont l'ensemble des phases, incluant la prévision finale, qui seront testées.

Les utilisateurs finaux des prévisions sont en général intéressés plus directement par ces critères classiques, qui permettent de mieux qualifier l'adéquation de la prévision à leurs besoins propres.

Malheureusement, on ne dispose pas de la même procédure générale d'inter-comparaison des modèles que pour les critères intrinsèques. On peut envisager plusieurs raisons à cela :

- si les modèles opérés par les services météorologiques ont un domaine de définition mondial, les principales applications (pour les précipitations notamment) concernent surtout leur territoire national. Ainsi, on ne dispose pas a priori d'information sur la qualité de prévision d'un modèle américain sur le Pays de Caux (ni réciproquement de ceux de Météo-France sur le Texas...).
- Enfin, si les différents services ont pu s'accorder sur la définition de quelques critères intrinsèques, les critères « orientés utilisateurs » sont par définition plus nombreux, ce qui rend les comparaisons aussi moins directes.

Ainsi, nous ne disposons pas d'informations publiées *spécifiques* sur les performances comparées des prévisions de précipitations sur les bassins-versants du Pays de Caux.

## **La prévision immédiate**

Signalons en marge de la prévision « classique », et pour les plus courtes échéances (inférieures à 12 heures), l'existence des techniques alternatives dites de « prévision immédiate ».

Rappelons tout d'abord que les modèles numériques passent par une phase de mise en équilibre pendant laquelle les paramètres du modèle vont présenter des oscillations s'atténuant progressivement. Ainsi, pendant les premiers pas de temps (et en fait pendant les premières heures), l'information de prévision n'est pas exploitable.

Or, certains phénomènes comme les orages générateurs de crues rapides nécessitent des échéances de prévision de quelques heures au plus. Dans ce cas, on utilise directement l'observation recueillie (par exemple des images radar).

On peut ainsi calculer le déplacement des zones de pluie grâce à l'analyse d'une série d'images, et faire l'hypothèse d'une prolongation de ce déplacement vers le futur. Ce type d'extrapolation temporelle a bien sûr ses limites, et des prévisions de ce type ne peuvent dépasser une à quelques heures au mieux.