

LA FRANCE QUI S'ÉCOULE ET LA FRANCE QUI RUISSELLE

Alain GIRET

Résumé

Les hydrogrammes de 91 cours d'eau métropolitains ont été décomposés entre un écoulement rapide de crue (E.R.C.) et un écoulement souterrain (E.S.T.). La répartition géographique des résultats discrétisés en 7 classes rend compte « d'une France qui s'écoule et d'une France qui ruisselle ». L'explication relève de la structure hydrologique : précipitations, géologie et énergie du relief. En effet, cette répartition géographique confirme le rôle de la géomorphologie confrontée à l'erratisme des précipitations. Les cours d'eau français se retrouvent divisés en quatre ensembles. Sur les massifs anciens océanisés, l'E.R.C. constitue la réponse à toute augmentation des précipitations (roches aquicludes). Les bassins sédimentaires réagissent par une progression simultanée de l'E.R.C. et de l'E.S.T. (rôle des roches aquitares). En montagne, il faut tenir compte du rôle des débâcles nivales (E.R.C.) et de la fonte des glaces (E.S.T.). Enfin, le processus de ruissellement est exacerbé dans les montagnes méditerranéennes. Ces comportements hydrologiques expliquent l'occurrence des crues (et des étiages) sur les grands bassins versants.

Mots-clés

petits bassins versants, hydrogramme, écoulement rapide de crue, écoulement souterrain, structure hydrologique.

Abstract

The hydrographs of 91 streams have been analysed and parted in an overflow (E.R.C.) and a throughflow (E.S.T.). The geographical distribution of the results has been discretized in 7 groups. Their distribution shows « a France who knows the throughflow and a France who know the overflow ». It is explained by the role of the hydrological structure: the rains, the geology and the relief. Indeed, this geographical distribution bears out the role of the geomorphology in front of the changes of the rains. The French hydrological networks seem to be divided in four groups. On the oceanic old blocks, The E.R.C. is the hydrological response in front of an increased rainfall (permeable rocks). The sedimentary basins know a simultaneous increase of the E.R.C. and of the E.S.T. (impermeable rocks). In the mountains, we take the snow outburst (E.R.C.) and the glacia outburst (E.S.T.) into consideration. Finally, these process of the runoff is exacerbated in the mediterranean mountains. These hydrological performances explain the occurrence of the floods (and of the low water levels) in the larges watersheds.

Keywords

small watersheds, hydrograph, overflow, throughflow, hydrological structure

I. INTRODUCTION

Si l'écoulement rassemble la part des pluies qui a échappé à l'évapotranspiration, les conséquences d'une même averse seront différentes sur un bassin versant peu accidenté et aquitaire ou de forte énergie et aquiclude. Dans le premier cas, une grande partie des pluies non évaporées va plutôt s'infiltrer vers les nappes phréatiques qui ne la restitueront qu'avec parcimonie : c'est l'écoulement de base que nous nommerons « *écoulement souterrain* ». Dans le second cas, l'averse aura ruisselé sur le

sol, et généré une onde de crue dans les chenaux : c'est le ruissellement que nous préférons appeler « *écoulement rapide de crue* ». Ces deux processus peuvent être séparés sur l'hydrogramme journalier.

La décomposition des hydrogrammes de 91 cours d'eau métropolitains a permis de réaliser une carte des espaces voués au ruissellement discontinu, ou à l'écoulement pérenne. L'objectif était de repérer les régions qui associent la pénurie au cours des « *années sèches* » et les inondations en période d'abondance pluviale, afin de les opposer

aux secteurs favorables à l'infiltration et à la constitution de réserves souterraines. À cet effet, nous avons dû mettre au point une méthode de décomposition de l'hydrogramme, associée à un choix de cours d'eau représentatifs de leur région.

II. CONCEPTS ET MÉTHODE

Les coordonnées Lambert des 2 422 stations hydrométriques publiées par la « Banque Hydro » ont constitué un fond de carte de France (Figure 1) : chaque station est marquée par un point et les cours d'eau utilisés par un cercle. La géologie, la topographie et le climat d'un cours d'eau devant être très homogène, nous avons réduit la prospection aux bassins de 100 à 500 km², mais régulièrement répartis sur l'ensemble du territoire.

A. Premier concept : écoulement superficiel et écoulement souterrain

Dès 1906, Maillet avait démontré que la vidange des réservoirs d'un bassin versant obéissait à une fonction exponentielle régressive du temps t et du type : $Q_t = Q_0 \cdot e^{-at}$ où Q_0 est le débit à l'origine et a un coefficient caractéristique du type de tarissement. L'exemple d'une courbe de tarissement (Figure 2.a) montre que la décrue du 10 février au 11 mars 1974, représentée en échelle semi-logarithmique, comporte quatre épisodes. AB ($a = 0,46029$) illustre les six jours de décrue du « ruissellement direct » (Q_d) à la surface du sol. BC ($a = 0,07636$) correspondrait aux 10 jours de « ressuyage des sols » ou « écoulement hypodermique » Q_h moins rapide. CD ($a = 0,02564$) et DE ($a = 0,00881$) correspondent au « tarissement » de la nappe du sidérolithique puis de celle de la craie campanienne.

Il est très difficile de séparer le ruissellement direct du ressuyage des sols (Figure 2.b.), tant les coefficients « a » sont imbriqués. Aussi, sur les conseils de Claude Cosandey, nous avons regroupé ruissellement direct et écoulement hypodermique sous le terme d'*écoulement rapide de crue* E.R.C. On lui oppose alors l'*écoulement souterrain* E.S.T. soit l'eau qui s'infiltré vers les nappes souterraines pour réapparaître dans les sources (sur la Figure 2.b. la limite entre E.R.C. et E.S.T. est imprécise, et arbitrairement, on l'assimilera à une droite). Mais E.R.C. est à l'origine des crues, alors qu'E.S.T. pérennise l'écoulement entre les épisodes pluvieux.

Le bilan peut alors s'écrire $P = E.T.R. + E.R.C. + E.S.T.$ (valeurs exprimées en mm d'eau chus ou écoulés). La relation entre les trois facteurs du passif relève du climat (P et E_{tr}), de l'énergie du relief (E.R.C.) et de la nature du sous-sol (E.R.C. sur les roches aquicludes et E.S.T. à l'intérieur des faciès aquitares).

B. Deuxième concept : la structure hydrologique

Cette expression, empruntée à Roger Lambert (1995), regroupe trois concepts fondamentaux : les faciès des roches encaissantes des bassins versants, l'énergie de leur relief (dénivellation du bassin et pente moyenne du chenal) et les précipitations.

1. Trois faciès représentatifs ont été retenus : roches du socle, roches carbonatées et sédiments détritiques. Les cartes de la Figure 3.a en illustrent la répartition géographique. 44 bassins versants sont inscrits dans les roches anciennes : Massif Central, Massif Armoricain, Vosges, Provence, massifs centraux des Alpes et des Pyrénées. 36 bassins sont inscrits dans des roches carbonatées (plus ou moins aquitares) : Bassin de Paris, Bassin Aquitain et chaînons calcaires du Jura, des Préalpes et des Pyrénées. 11 bassins appartiennent à des faciès argilo-sableux et sableux : sud du Bassin Aquitain, Flandre, Limagne et Roussillon. Cette répartition rend compte de la diversité entre massifs montagneux prédisposés au ruissellement, et bassins sédimentaires plus propices à l'infiltration et à l'E.S.T.

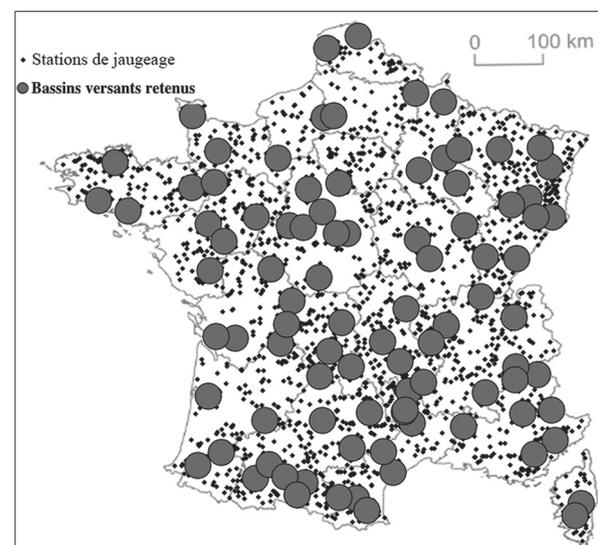


Figure 1. Répartition géographique des 91 bassins versants

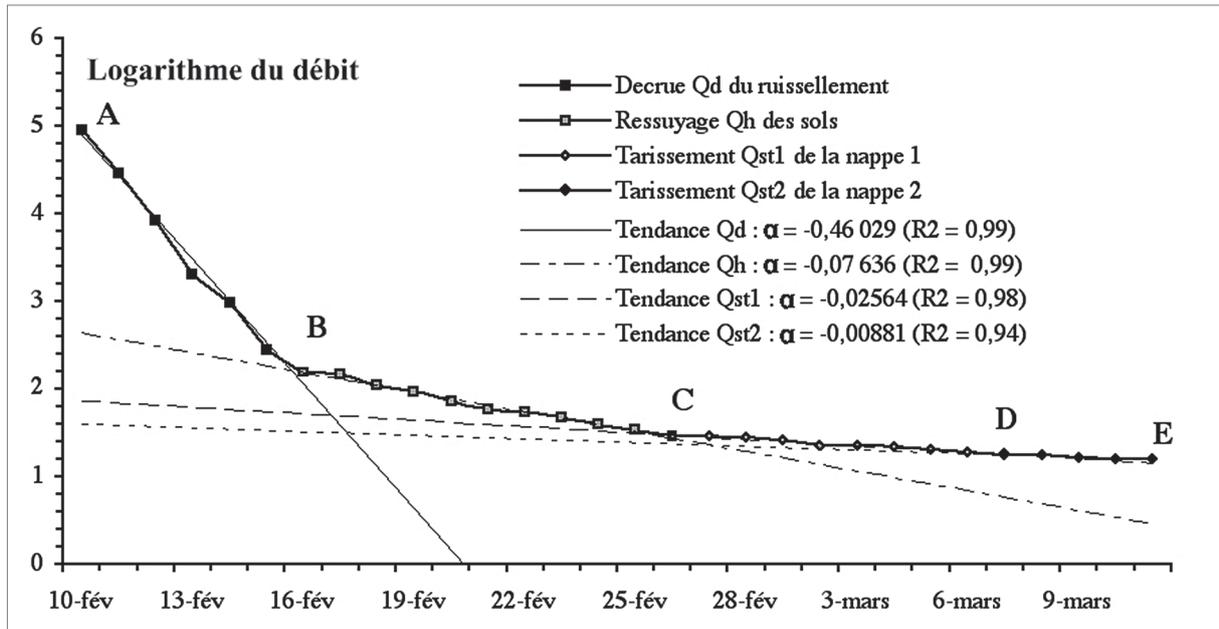


Figure 2.a. Concept de la décomposition géométrique de l'hydrogramme - La Seudre (Charente-Maritime) : courbe de tariissement du 10-02 au 11-03-1974

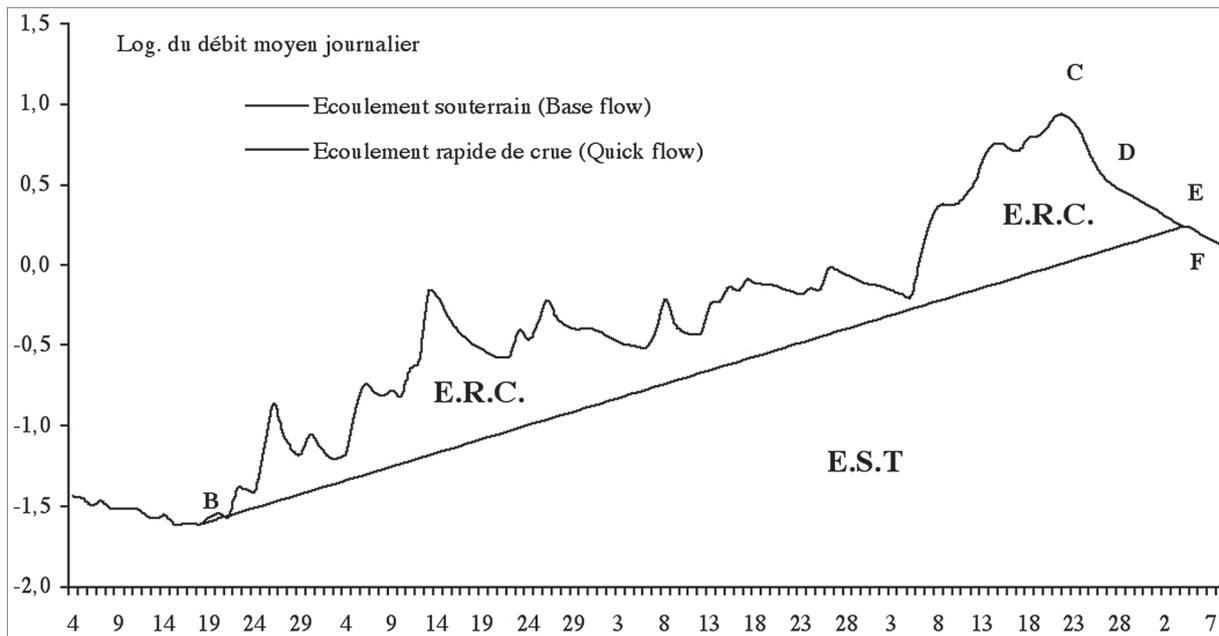


Figure 2.b. Concept de la décomposition géométrique de l'hydrogramme - Hydrogramme de la Seudre entre le 04-09-1982 et le 08-01-1983

2. *L'énergie du relief* a été rendue par la dénivellation maximale des bassins versants et la pente moyenne de leur chenal principal (Figure 3.b). Pour chacun de ces paramètres, il existe 91 cas de Figures qu'il a fallu discrétiser. En appliquant la méthode de Huntsberger, le nombre de classes d'un effectif de 91 données est de $K = 1 + (3,3 \times \log.91) = 7$; ce qui répartit dénivellations et pentes moyennes en autant de classes. Le rôle de la géomorphologie s'en

trouve mis en valeur ; les bassins versants les plus accidentés occupent la moitié sud-est de la France : des Vosges à la Provence et au Pays Basque.

Mais les fréquences introduisent quelques nuances. Sur 56 bassins versants (2/3), la dénivellation est supérieure à 100 m, et deux ensembles dominent : la classe 6 (632 à 1 236 m) rassemble 23 % des cours d'eau montagnards (Alpes, Pyrénées, Auvergne et

Vosges), tandis que la classe 3 (84 à 134 m) regroupe 27 % des bassins « collinéens » du Limousin et des Cévennes et des cuestas des bordures orientale du Bassin de Paris et septentrionale du Bassin Aquitain.

La pente moyenne du chenal principal relève surtout des classes 3 (2 à 4,4 %), 4 (4,5 à 10 %) et 5 (10,1 à

22,8 %), soit 61 cours d'eau (2 sur 3). Ils drainent les collines et plateaux du Massif Central, du Massif Armoricain et les régions périphériques des grands bassins sédimentaires. Les cours d'eau à très faible (< 2 %) ou très forte pente (> 23 %) sont plutôt rares et localisés en Flandre et en Île-de-France, pour les premiers, et dans les Alpes, les Pyrénées, les Cévennes et la Corse, pour les seconds. Plus le

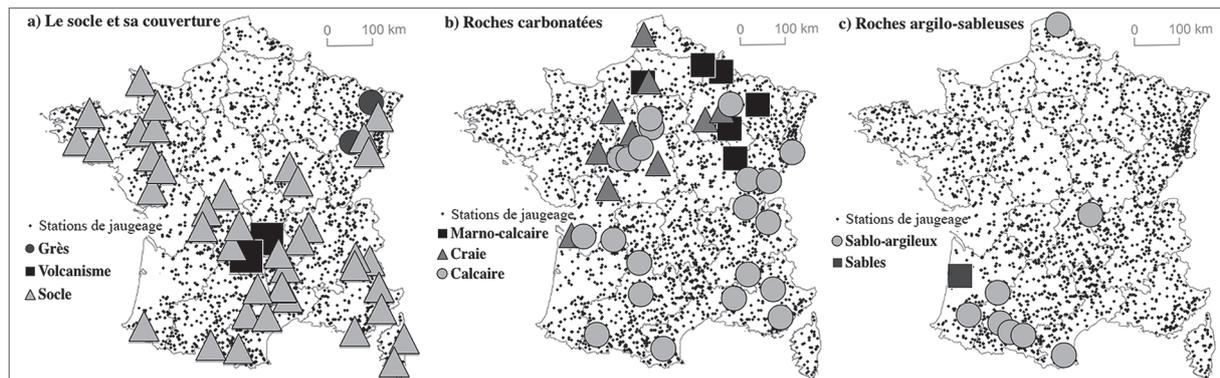


Figure 3.a. Les paramètres de la structure hydrologique - Répartition des principaux faciès

relief est énergique, plus on craindra l'occurrence d'un E.R.C. à la suite d'un long épisode pluvieux ou d'une brève mais copieuse averse.

3. Il a été possible de reconstituer la pluviométrie des bassins versants

Son rôle est essentiel car l'écoulement pluvio-évaporal domine. Mais l'écoulement d'un aussi grand nombre de cours d'eau ne pouvait être comparé que sur une même durée. Or beaucoup de jaugeages n'ont débuté qu'après 1970, pour cesser à la fin des années 1990. Comme la méthode que nous allons évoquer prend du temps, il a fallu réduire la période d'observations. On n'évoquait pas le dérèglement du climat quand survint la « sécheresse de 1976 » qui succédait à une période de déficit pluviométrique. Or, elle fut suivie d'une année hydrologique très arrosée. Nos recherches ont donc été effectuées du 1^{er} août 1975 au 31 août 1977 : période recouvrant l'occurrence d'une grave sécheresse et le retour des averses.

La Figure 3.c. fait état de la pluviométrie des 91 bassins versants. Les maxima concernent les Alpes, les Cévennes, les Pyrénées, les Vosges et le Massif Armoricain. Les minima relèvent de l'abri : centre des bassins sédimentaires, Pyrénées Orientales et « anomalie pluviométrique » de la basse vallée du Rhône. Après discrétisation, les précipitations

reçues par 70 cours d'eau (8 sur 10), relèvent de la classe 2 (596 à 716 mm), de la classe 3 (717 à 861 mm) et de la classe 4 (862 à 1 035 mm), ce qui corrobore la moyenne nationale.

C. La méthode de décomposition de l'hydrogramme

Elle repose sur l'application de la loi de Maillet : $Q = Q_0 \cdot e^{-a \cdot t}$, et de la résolution de son équation linéaire équivalente $\log Q = \log Q_0 - a \cdot t \cdot \log e$. Sur une feuille de calcul Excel (Figure 4.a et b) on reporte les données utilisées :

- On indique la lame d'eau écoulee en 24 heures : Q_{mm} , et son logarithme décimal $\log Q_{mm}$ afin d'obtenir un hydrogramme constitué d'une « ligne brisée ».
- La date et les points de rupture de l'hydrogramme Pts sont numérotés, en boucle, de A à Z. Les décrues et les tarissements répondent à une fonction exponentielle régressive, en échelle semi-logarithmique leur transcription sera une droite. Après l'averse, les réservoirs les plus précaires cessent de se vidanger les premiers, et l'hydrogramme dessine une *ligne brisée* où, chaque point d'inflexion marque la transition entre E.R.C. et E.S.T. : C, D et E sur la Figure 4. Sur cette même Figure XY et AB rendent compte de la progression de l'E.S.T, mais en Y et en B, le graphique révèle une augmentation du débit, ce

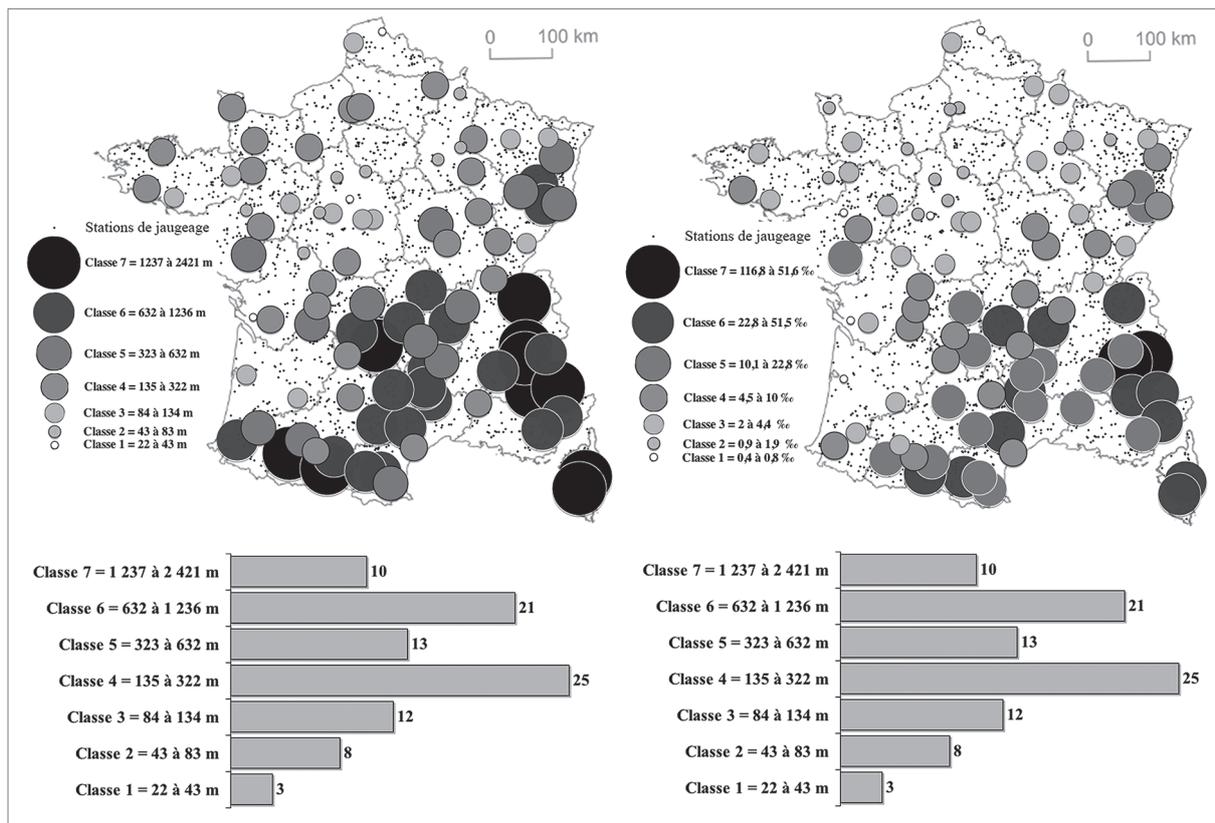


Figure 3.b. Les paramètres de la structure hydrologique - L'énergie du relief : à gauche, la répartition et la fréquence des classes de dénivellations moyennes, et à droite, celles de la pente moyenne du chenal principal

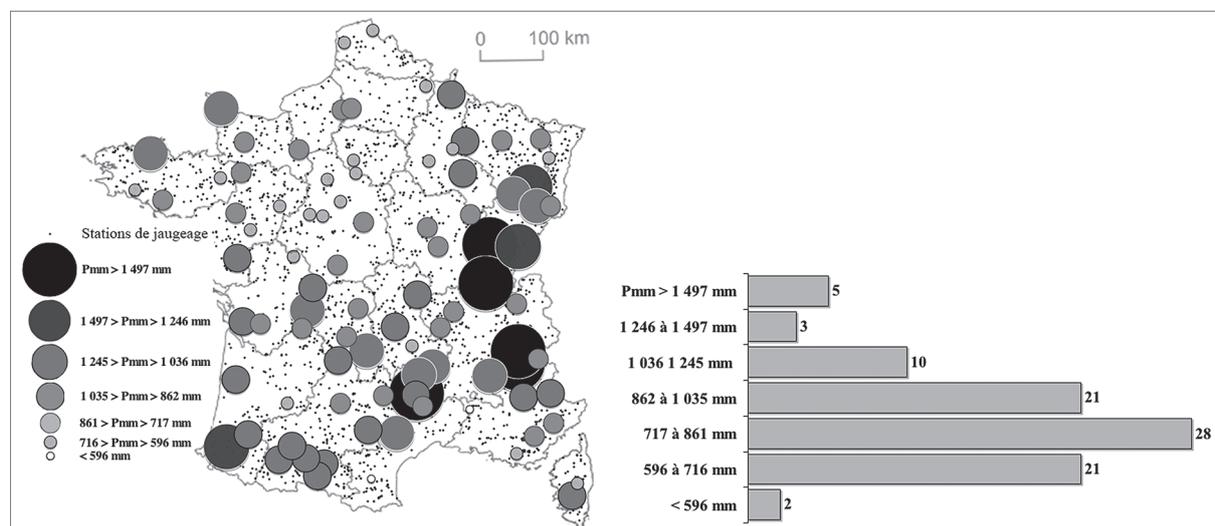


Figure 3.c. Les paramètres de la structure hydrologique - Répartition et discrétisation des précipitations entre le 01-08-1975 et le 31-08-1977

que nous analysons comme les phases de crue des écoulements rapides ZZZ'A et BCD.

➤ Le coefficient « a » de tarissement de l'équation $\log Q = \log Q_0 - a.t.\log.e$ est fondamental, car sa valeur indique le mode d'écoulement, et le graphe de l'équation est la traduction linéaire d'un type

d'écoulement donné.

➤ La durée de l'E.R.C. (soit du ruissellement) sert à calculer E.R.C. et E.S.T.

➤ L'E.S.T. peut être visible (XY et AB) mais elle est souvent masquée par l'E.R.C. Or, le graphique ne permet pas de déterminer l'interface entre

Qmm	0,026	0,027	0,028	0,029	0,030	0,031	0,031	0,034	0,038	0,039	0,038	0,038	0,038	0,037	
log Qmm	-3,170	-3,154	-3,138	-3,123	-3,108	-3,094	-3,080	-3,041	-3,005	-2,994	-3,005	-3,005	-3,005	-3,017	
Date	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Pts	X						Y		Z	Z'					A
Vecteur de l'écoulement	WX						XY		YZ	ZZ'				YA	ZA
Coefficient "a" de tarissement	-0,00842						0,03118		0,10180	0,02598				0,02212	-0,00752
Durée de l'Erc							0	1	2	3	4	5	6	7	8
E.S.T. mm	0,026	0,027	0,028	0,029	0,030	0,031	0,031	0,032	0,032	0,033	0,034	0,035	0,035	0,036	0,037
E.R.C. mm								0,002	0,006	0,006	0,004	0,003	0,003	0,002	

Qmm	0,038	0,040	0,041	0,041	0,048	0,056	0,067	0,069	0,082	0,072	0,051	0,050	0,049	0,044	1,250
log Qmm	-3,005	-2,983	-2,972	-2,972	-2,904	-2,837	-2,759	-2,746	-2,671	-2,728	-2,877	-2,886	-2,895	-2,913	-2,942
Date	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3	4	5	6	8	
Pts				B					C		D			E	
Vecteur de l'écoulement				AB					BC	BD	CD			DE	
Coefficient "a" de tarissement				0,02813					0,13525	0,03118	-0,23745			-0,02912	
Durée de l'Erc				0,000	1,000	2,000	3	4	5	6	7			0	
E.S.T. mm	0,038	0,040	0,041	0,041	0,042	0,044	0,045	0,046	0,048	0,049	0,051	0,050	0,049	0,047	1,108
E.R.C. mm					0,006	0,012	0,022	0,023	0,034	0,023					0,145

Figure 4.a. Méthode et résultats de la décomposition analytique de l'hydrogramme - Organisation de la feuille de calcul pour l'Hyrome à Chanzeaux entre le 10-08 et le 08-09-1975

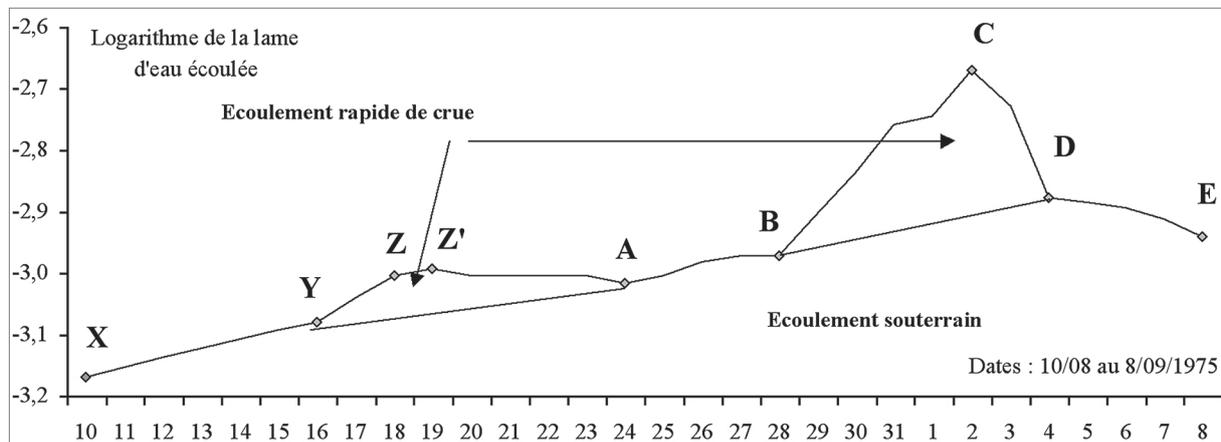


Figure 4.b. Méthode et résultats de la décomposition analytique de l'hydrogramme - Illustration graphique de l'épisode

E.R.C. et E.S.T. Par convention, cette transition est illustrée par une droite YA et BD (et BF sur la Figure 2) dont l'équation sert à calculer la part probable de l'E.S.T. La valeur d'E.R.C. est obtenue en retranchant l'E.S.T. de l'écoulement global mesuré, soit $E.R.C. = Q_{mm} - E.S.T.$ Cette méthode géométrique a permis de décomposer les 91 hydrogrammes du 1^{er} août 1975 au 31 août 1977. Il n'est pas possible de les représenter tous, mais l'hydrogramme du Loch, en Bretagne, illustre une originalité de la plupart des petits bassins versants où l'E.R.C. domine l'écoulement (Figure 5).

III. RÉSULTATS

L'écoulement moyen des 91 cours d'eau est de 1 065 mm : 719 mm ou 68 % relèveraient de l'E.R.C. et 346 mm ou 32 % de l'E.S.T. Mais la

transition entre une « pulsation pluviométrique sèche » (1975-1976) et « une pulsation humide » (1976-1977) s'est traduite par un accroissement plus important de l'E.R.C. (Figure 6). En effet, au cours de l'année hydrologique 1975-1976 (13 mois car le calcul va du 1^{er} août 1975 au 31 août 1976), l'ensemble n'écoula que 351 mm en moyenne avec, toutefois, un E.R.C. légèrement plus élevé (202 mm). Mais si l'année suivante (1^{er} août 1976 au 31 août 1977), l'écoulement global - 745 mm - avait été multiplié par 2,1, l'E.S.T. - 203 mm - ne progressa que d'un facteur de 1,4 face à un effet multiplicateur de 2,7 pour l'E.R.C. - 542 mm.

A. La France qui s'écoule et la France qui ruisselle

La répartition géographique des deux modes d'écoulement illustre le rôle des différentes

structures hydrologiques. Cependant, si la décomposition des 91 hydrogrammes a permis de calculer l'E.R.C. et l'E.S.T. de chaque cours d'eau, les débits de bassins de tailles différentes ne sont pas homogènes, aussi l'E.R.C. et l'E.S.T. sont-ils également exprimés en pourcentages de l'écoulement global. Ces valeurs ont été discrétisées en sept classes que la Figure 7 traduit en fréquences et en répartition géographique.

En valeurs absolues, l'E.R.C. fut très abondant dans la moitié sud-est de la France et en Bretagne du fait d'un sous-sol aquiclude, d'un relief érigé et d'une abondante pluviométrie de saison froide ; les valeurs relatives confortent cette répartition. Sur les 91 cours d'eau, 79 (87 %) relèvent des classes 4 à 7, les lames écoulées vont de 144 mm à 2 757 mm sous forme de crues, et 51 d'entre eux (56 %) ont ruisselé entre 302 mm et 1 318 mm d'eau. Sur 76 bassins (84 %), le ruissellement a concerné entre 44 et 94 % de l'écoulement, dont plus d'1/4 entre 69 % et 80 %. Sur ce couple d'années hydrologiques très contrastées, l'E.R.C. fut la réponse la plus appropriée à l'occurrence de précipitations.

L'E.S.T. (garantie de la pérennité de l'écoulement) offre une répartition aussi tranchée. Il n'est majoritaire que sur 53 bassins versants (50 %) des classes 4 et 5. Beaucoup relèvent d'une structure hydrologique favorable : sédiments aquitains des bassins sédimentaires, et de chaînons pyrénéens, alpins, languedociens et provençaux. Mais, dans les secteurs fortement arrosés du Limousin, du Massif Armoricain, des Pyrénées occidentales, des Vosges, la fracturation de la roche encaissante ou la présence de formations superficielles et d'altérites favorisent une circulation souterraine. Enfin, dans les Alpes, quatre cours d'eau font l'objet d'un abondant E.S.T. du fait d'un apport glaciaire. En effet, glaciers et névés constituent une réserve permanente fonctionnant comme une nappe souterraine en assurant la pérennité estivale de l'écoulement.

B. Répartition régionale et rôle de la structure hydrologique

Cette structure explique la variation de l'E.R.C. et de l'E.S.T. après la reprise pluviométrique de septembre 1976 : après un printemps aride et un été

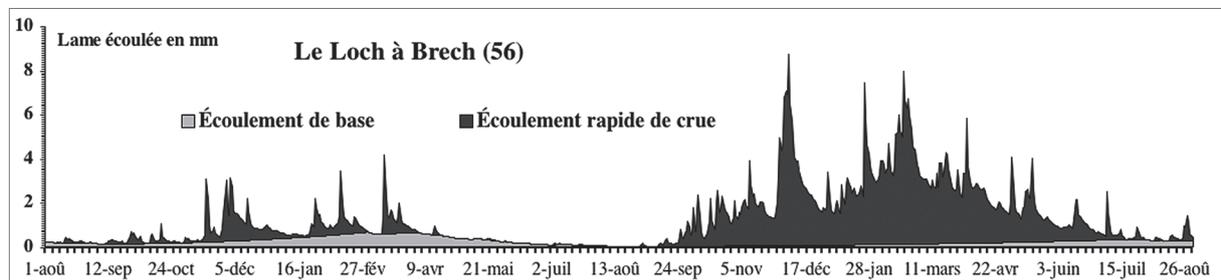


Figure 5. La croissance de l'écoulement rapide de crue entre 1975 et 1977

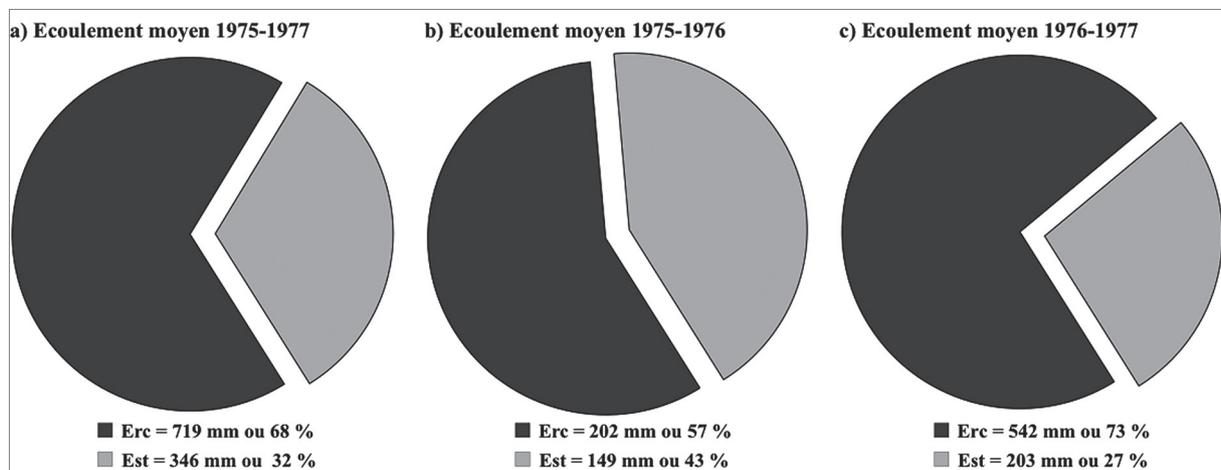


Figure 6. Total des E.R.C. et des E.S.T. des 91 bassins versants

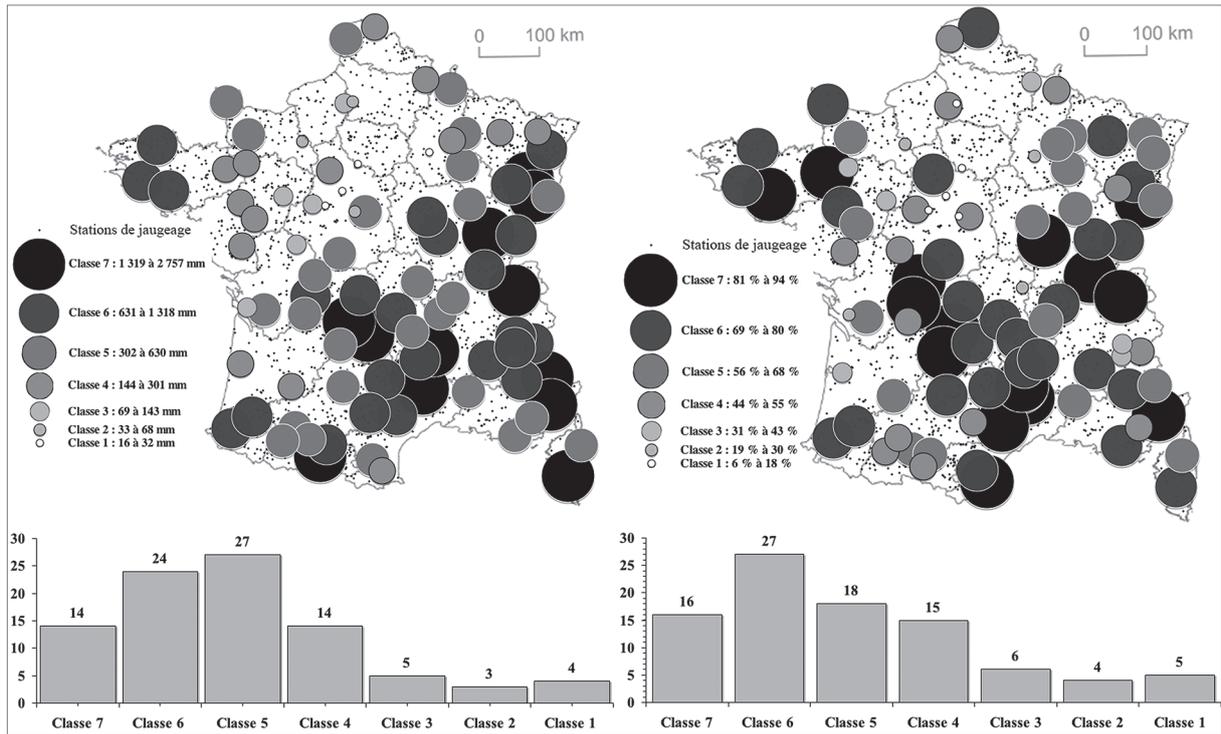


Figure 7.a. Discretisation de l'E.R.C. et de l'E.S.T. (par définition, les fréquences et les cartographies des valeurs relatives sont inverses l'une de l'autre) - Répartition géographique et fréquence de l'E.R.C. brut et relatif

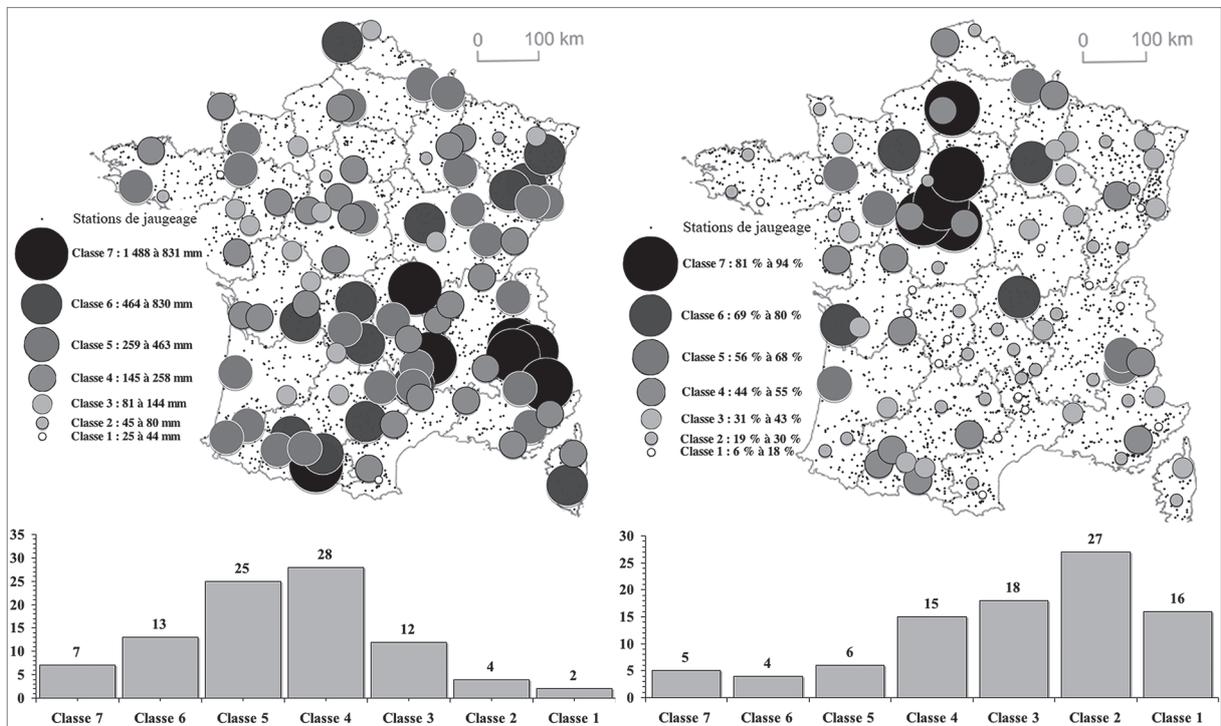


Figure 7.b. Discretisation de l'E.R.C. et de l'E.S.T. (par définition, les fréquences et les cartographies des valeurs relatives sont inverses l'une de l'autre) - Répartition géographique et fréquence de l'E.S.T. brut et relatif

sec, l'automne de 1976 et l'hiver qui suivit furent particulièrement arrosés.

1. Le ruissellement domine l'écoulement des massifs anciens océanisés : Massif Armoricain, Massif Central et Vosges cristallines (Figure 8). Leur relief manque d'énergie : le dénivelé de la moitié des bassins reste compris entre 135 et 322 m (classe 4), 41 % des chenaux ont une pente comprise entre 4,5 et 10 % (classe 5). À l'exception des Vosges, ces bassins versants sont peu arrosés et la classe 3 des précipitations (717 à 816 mm) domine. Mais le retour des pluies cycloniques en septembre 1976 eut deux effets : 38 % des bassins versants ont reçu plus de 862 mm, et, sur près de la moitié, les précipitations se sont accrues de 68

à 86 % (classe 4), et elles ont doublé sur 70 % d'entre eux. La géologie souvent aquiclude (socle et coulées volcaniques) favorisa l'E.R.C. aux dépens de l'E.S.T.

L'E.R.C. relatif constitua 40 % et plus du total écoulé (Figure 8.a). Surtout ce ruissellement dépassa 70 % sur plus des 2/3 des cours d'eau et 80 % sur 1/4 d'entre eux. L'E.R.C. le moins abondant (classe 4) ne concerne que les bassins « abrités » de la bordure occidentale du massif Armoricain. À l'inverse, l'E.S.T. relatif resta ténu : < 30 % sur 65 % des cours d'eau, et 1/4 d'entre eux écoula moins de 20 % des eaux par tarissement des sources. Après 1976, l'important accroissement pluviométrique (entre 41 % et 86 %) provoqua

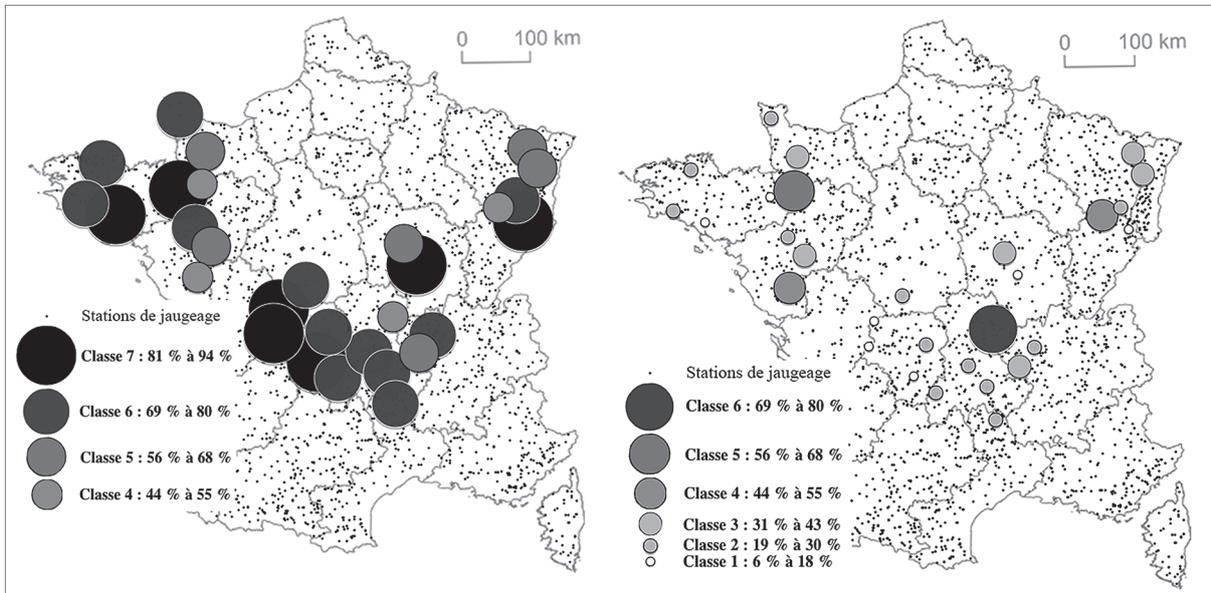


Figure 8.a. Bassins versants du domaine hercynien océanisé - L'ampleur de l'E.R.C. (à gauche) face à la modestie de l'E.S.T. (à droite)

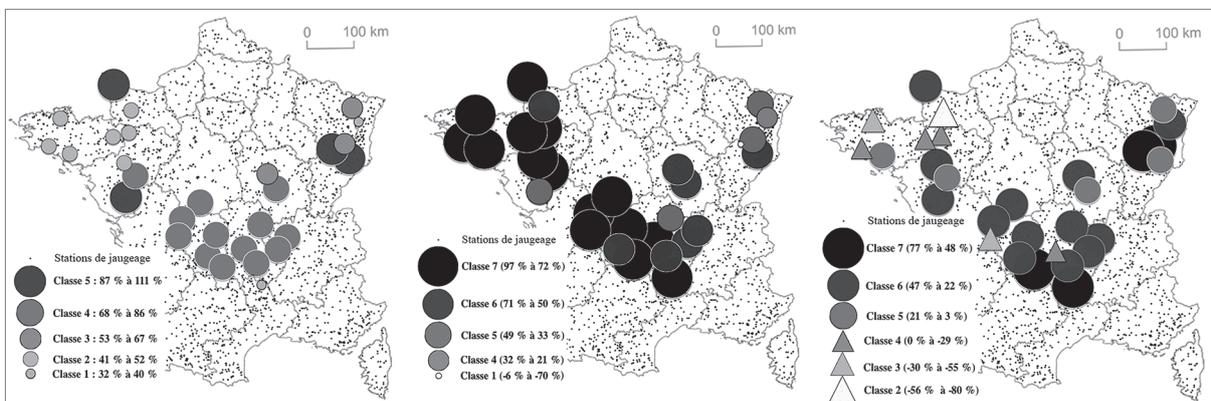


Figure 8.b. Bassins versants du domaine hercynien océanisé - L'importance commune de l'augmentation de l'E.R.C. (au centre) et la disparité de l'E.S.T. (à gauche) face à l'augmentation des précipitations (à droite)

celui de l'écoulement : E.R.C. et E.S.T. confondus (Figure 8.b). Sur la moitié des cours d'eau l'E.R.C. a cru de plus de 70 %, et sur 80 % cette augmentation fut de 50 %. Cette progression concerna la quasi-totalité des cours d'eau des massifs anciens, seuls les bassins vosgiens ont connu un moindre progrès de leur E.R.C., du fait de la présence de grès.

Certes l'E.S.T. augmenta simultanément sur plus des 3/4 des cours d'eau, et la classe 6 (22 % à 47 %) en regroupe 45 % (Massif Central et Massif Armoricaïn surtout). Or, après 1976, il arriva que le tarissement des sources recule : Isch et Savoureuse (Vosges), Couze de Pavin, Gorre et Ternin (Massif Central), Aven, Chevré, Ernée, Hyrome, Léguer, Loch et Vire (Massif Armoricaïn). Quand l'E.S.T. progresse, on évoque les grès (Vosges), les scories (Auvergne) voire la fracturation et l'altération en boule des granits (Limousin). Mais comment interpréter son recul ? La déprise rurale favorisa le reboisement et l'engazonnement des massifs anciens, le sol est mieux protégé. Mais l'emprise agricole est parfois restée forte, dominée par la polyculture. Dans le Massif Armoricaïn, la destruction du bocage profita au ruissellement, aux dépens de l'infiltration vers les nappes, souvent précaires. Nous interprétons ainsi les inondations de Quimperlé et de Redon à la fin du XX^e siècle !

2. Le comportement est plus contrasté sur le Bassin de Paris et le Bassin Aquitain

Le Bassin de Paris jouit d'un climat océanisé (pluies maximales en saison froide). Mais si le littoral est « pluvieux », l'Île-de-France est « abritée », alors qu'avec le relief, la pluviométrie s'accuse en Champagne et en Lorraine. Partout, les calcaires et la craie abritent des nappes souterraines. À l'inverse, si la partie orientale du Bassin Aquitain est formée de plateaux calcaires du Périgord au Quercy, à l'ouest et au sud, le démantèlement des Pyrénées a fourni des sédiments détritiques favorables au ruissellement. Cependant, le climat océanisé est plus homogène, chaud en été et pluvieux en hiver. Enfin, le relief aquitain est plus énergique (médiane des dénivelés : classe 4, médiane des pentes : classe 3) que celui du Bassin Parisien (médiane des dénivelés : classe 3, médiane des pentes : classe 2). L'Aquitaine apparaît plus propice à l'E.R.C., et les mollasses y sont plus aquicludes que la craie et les calcaires lacustres du centre du Bassin de Paris. Ces deux bassins n'ont été que moyennement

arrosés : pour 2/3 des cours d'eau, les précipitations relèvent de la classe 3 (717 à 861 mm) ou de la classe 2 (596 à 716 mm). Cependant, le Bassin Aquitain, ouvert sur l'Atlantique et entouré de montagnes, est mieux alimenté (835 mm) que le Bassin de Paris (749 mm). Retenons aussi l'influence maritime (deux cours d'eau ont une pluviométrie de classe 7 : la Risle en Normandie et la Seudre en Charente-Maritime) qu'on opposera à l'abri relatif du Centre du Bassin de Paris et des Pays de la moyenne Garonne (classe 1 à 3).

Toutes les classes d'E.R.C. sont représentées (Figure 9.a) et 1/4 des cours d'eau seulement relève de la médiane, la classe 4 (44 à 45 % de l'écoulement total). Le ruissellement domine, sur 2/3 des bassins, l'E.R.C. concerne entre 44 et 80 % du module. L'E.R.C. fut ainsi maximal sur les collines de Gascogne, d'une part, et le long des cuestas lorraines et champenoises, d'autre part. À l'inverse, l'E.R.C. fut minimale sur les plateaux calcaires ou crayeux, peu accidentés et peu arrosés, du centre du Bassin de Paris. La répartition de l'E.S.T. (Figure 9.b) souligne cette dualité. L'Aquitaine est un pays de ruissellement, tout comme la Champagne et la Lorraine des cuestas. Sur 7 bassins versants sur 10, le taux d'E.R.C. s'est accru de 50 % pour atteindre 97 % sur le Né (Charente), mais le taux d'E.S.T. augmenta de façon presque identique et sur les 3/4 des bassins, la croissance de l'E.S.T. était de classe 5 (33 à 49 %) et de classe 6 (50 à 71 %).

Pourquoi ? La relation entre roches poreuses et aquicludes, entre sous-sol et formations superficielles n'explique pas tout. Ces bassins sont des pays de grandes cultures, où, le sol est labouré en automne et laissé nu en hiver. Dans notre thèse, nous avons souligné que, selon le volume des averses, la marge entre infiltration et ruissellement est étroite. Selon la météorologie, un sol labouré peut favoriser soit l'infiltration, soit le ruissellement.

3. La montagne de type alpin se répartit en deux ensembles : les Pyrénées constituent une chaîne est-ouest, où l'impact des perturbations atlantiques recule vers l'est, alors que la chaîne alpine (avec le Jura), de direction méridienne, est mieux exposée aux perturbations.

Les Alpes du Nord sont les plus accidentées : dénivellations classes 6 (632 m à 1 236 m) et 7

(1 237 m à 2 421 m). Le rôle des précipitations solides y prend tout son sens : la neige dans l'occurrence du ruissellement de débâcle, et la glace dans le soutien de l'écoulement estival. Les pentes y sont également très fortes : classes 5 (10,1 à 22,8 %) à 7 (51,6 à 116,8 %), ce qui accentue l'E.R.C., notamment au cours de la débâcle nivale. Les Pyrénées centrales et occidentales sont aussi accidentées : dénivelés de classes 6 (632 m à 1 236 m) et 7 (1 237 m à 2 421 m), avec pour corollaire un écoulement influencé par la fonte des neiges. Bien qu'inférieure à celles des Alpes, la pente des chenaux reste forte : classe 4 (4,5 à 10 %) à 7 (51,6 à 116,8 %). Le ruissellement pluvial et la débâcle nivale se retrouvent favorisés. À l'inverse, le Jura, exclusivement calcaire, est moins

accidenté : dénivelés de classe 3 (84 à 134 m) à 4 (323 à 632 m) et pente du chenal principal de classes 3 (2 à 4,4 %) et 4 (4,5 à 10 %) seulement. Mais le sous-sol calcaire n'est pas toujours favorable à l'infiltration, l'eau ruisselle sur les lapiaz, et les glaciers quaternaires ont abandonné une puissante moraine de fond, aquiclude, et favorable au ruissellement. Enfin, ce sont des espaces froids, où la neige, sporadique dès 500 à 600 m, perdure de novembre à avril dans les hautes montagnes.

La variation entre une année sèche (1975-1976) et une année humide (1976-1977) se traduit par une grande différence entre le volume et la durée de l'enneigement (c'est ce qui sépare le Jura de la bordure orientale du Bassin de Paris).

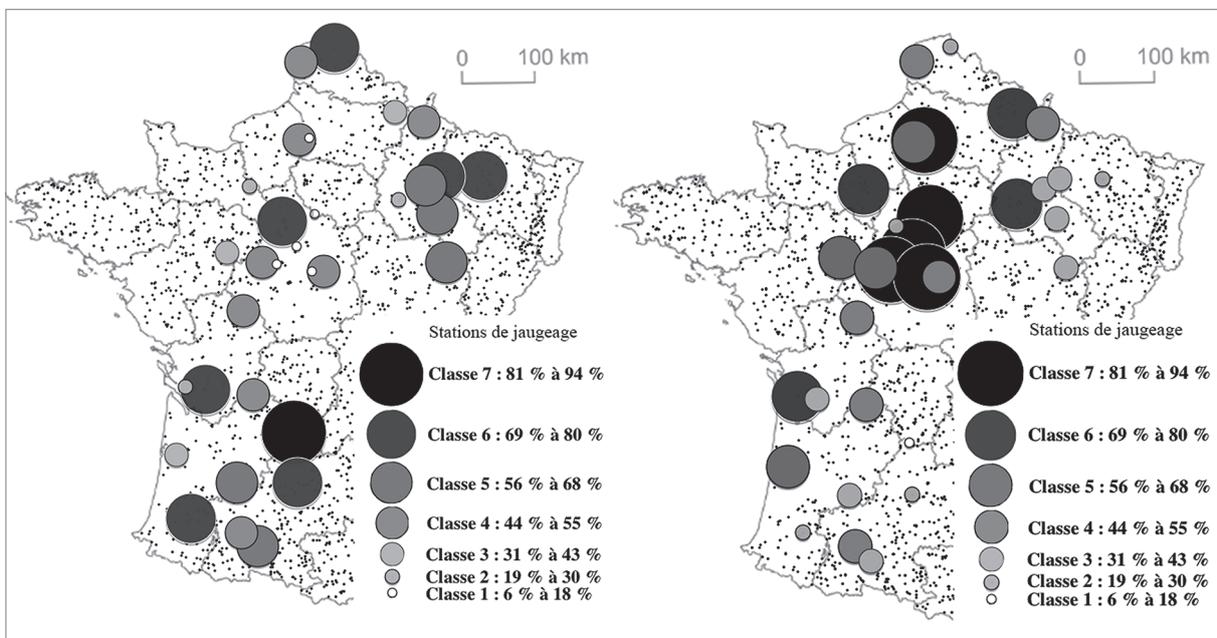


Figure 9.a. Bassins versants des grands bassins sédimentaires - La diversité de l'E.R.C. (à gauche) accompagne celle de l'E.S.T. (à droite)

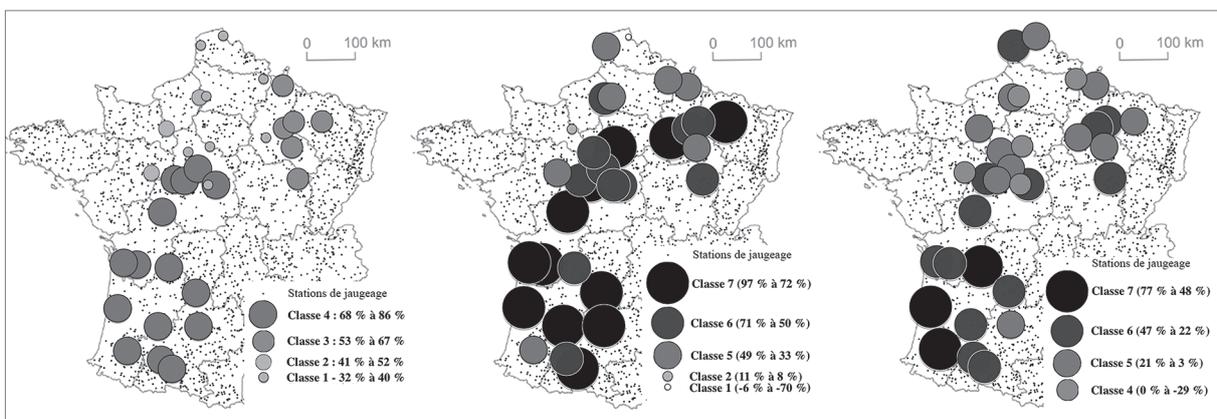


Figure 9.b. Bassins versants des grands bassins sédimentaires - L'augmentation de la pluviométrie (à gauche) provoque une croissance généralisée de l'E.R.C. (au centre) et de l'E.S.T. (à droite)

Quel fut l'impact de cette structure hydrologique (Figure 10.a) ? L'E.R.C. domine : conséquence d'un relief énergétique, d'une pluviométrie abondante et d'un épais tapis neigeux. Même les chaînons calcaires du Jura et des Préalpes sont impliqués dans ce processus. Il n'y a pas d'E.R.C. inférieur à la classe 4 (44 à 55 % de l'écoulement). À l'inverse, l'E.S.T. fut modeste : 1/3 des écoulements sont de classe 2 (19 à 30 %). Rappelons que l'E.S.T. de la Durance et de la Romanche relève de la classe 5 (56 à 68 %), du fait de la fonte des glaciers. Enfin, la forte augmentation des apports pluviométriques après 1976 se traduisit par une augmentation simultanée du ruissellement et du débit des sources (Figure 10.b). Ainsi, sur la moitié des cours d'eau, l'accroissement de l'E.R.C. releva de la classe 6 (50 à 71 %) et aucun exemple inférieur à la classe 4 (21 à 32 %) n'a été observé. Et sur près de 80 % des bassins, le débit des sources crut de 22 % à 77 % (classes 6 et 7). Ce sont les cours d'eau alpins et jurassiens dont le ruissellement augmenta le plus : classes 6 (50 à 71 %) et 7 (72 à 97 %), en phase avec le retour des averses.

À l'inverse, c'est dans les Pyrénées que les cours d'eau ont connu une augmentation massive de leur écoulement de base, classe 6 (22 à 47 %) et 7 (48 à 77 %), dont l'explication pourrait reposer sur un sous-sol plus propice à l'infiltration : calcaires, grès, schistes, tous fissurés par la tectonique. Les Alpes

et le Jura ont subi une progression du tarissement des sources du même ordre : classes 6 et 7, avec trois exceptions qu'il faut souligner. Le débit des sources resta stable sur l'Ill à Altkirch (un bassin versant calcaire), le Suran à Germagnat, (inscrit dans les calcaires jurassiens) et la Séveraisse à Villar-Loubière, où l'E.S.T. a même reculé (classe 4 : 0 à -29 %), malgré une pluviométrie de classe 7. Certes, pente du chenal principal et dénivelé du bassin versant sont de classe 7, ce qui favorise le ruissellement, mais nous évoquerons le karst. Quand le calcaire est fissuré (or la tectonique des montagnes est active), l'eau dissout la roche près des failles et des diaclases, pour circuler dans ces conduits, véritables chenaux souterrains: il ne s'agit plus d'un E.S.T. mais d'un E.R.C.

4. Avec la montagne méditerranéenne nous abordons là des bassins versants très sensibles aux averses du fait d'un relief très énergétique dont les versants sont mal protégés de l'aridité estivale. Mais ces mêmes bassins sont aussi sensibles aux sécheresses : l'ampleur de l'E.R.C. n'a d'équivalent que la rareté de l'E.S.T. Nous avons décomposé l'écoulement des cours d'eau de la Provence, de la Corse, des Cévennes et des Pyrénées Orientales dans un contexte géologique souvent aquiclude, une énergie du relief favorable au ruissellement montagnard, avec de très forts contrastes pluviométriques saisonniers et interannuels.

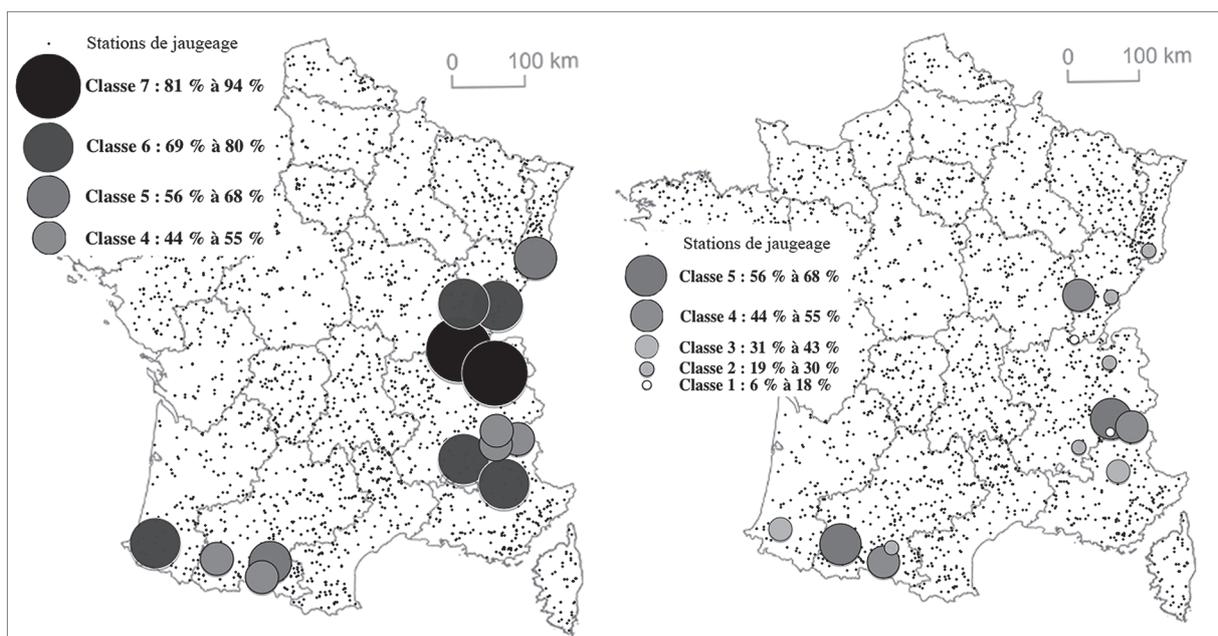


Figure 10.a. Bassins versants montagnards - La prédominance de l'E.R.C. (à gauche) et la modestie de l'E.S.T. (à droite)

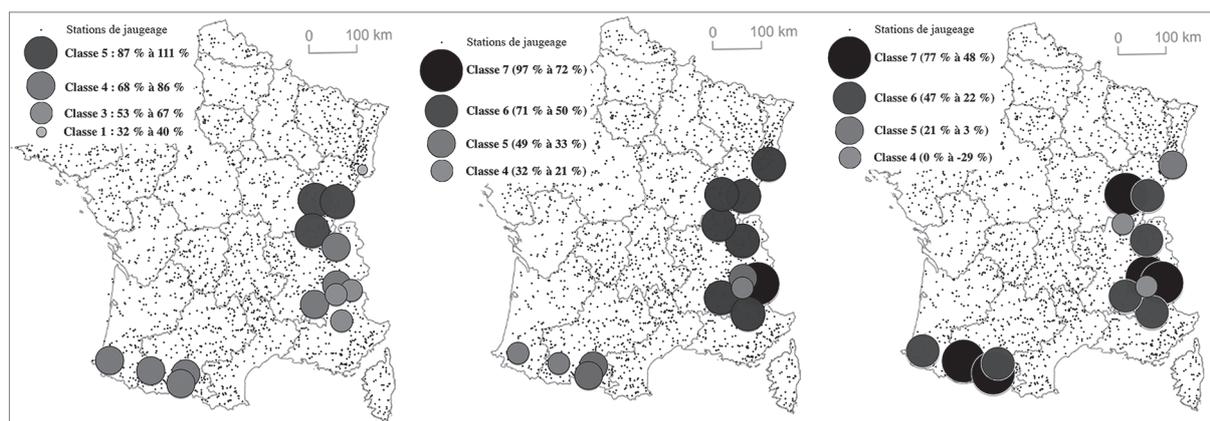


Figure 10.b. Bassins versants montagnards - L'augmentation du volume des averses (à gauche) provoqua une croissance généralisée de l'E.R.C. (au centre) et de l'E.S.T. (à droite)

Aussi ces bassins versants sont-ils le domaine du ruissellement (Figures 11.a et 11.b) : sur près de 70 % des cours d'eau, l'E.R.C. fut de classe 6 (31 à 43 %) à 7 (44 à 55 %), ce qui s'expliquerait par la brièveté de la saison des averses lesquelles sont très volumineuses (Figure 11.c). Dans huit stations météorologiques témoins - Nice et Marseille-Marignane (Provence), Orange, Nîmes et Sète (Languedoc), le Mont Aigoual et Le Massegros (Cévennes), Perpignan-Rivesaltes (Pyrénées-Orientales) - il a chu 1 114 mm de pluies (406 mm à Perpignan, mais 2 898 mm au Mont Aigoual), entre mai 1976 et mars 1977. Mais cet ensemble qui n'avait reçu que 170 mm du 1^{er} mai au 31 août 1976 accueillit 791 mm entre le 1^{er} septembre 1976 et le 31 mars 1977, quand l'air polaire océanique froid et humide se heurta à l'air maritime méditerranéen chaud et humide.

Trop brutales, ces pluies ont surtout ruisselé sur un sol desséché par un été quasi aride, et à la végétation affaiblie. On n'enregistra pas de crues cataclysmales, mais des débits impressionnants : la Mimente à Florac, qui n'écoulait que 0,1 mm d'eau le 1^{er} septembre 1976, écoulait 4,8 mm le 25 octobre, soit 48 fois plus, et 99,7 % de cet écoulement participèrent à l'E.R.C. Partout la croissance de l'E.R.C. fut considérable, alors que l'E.S.T. connaissait un recul important (Figure 11.a). La croissance du ruissellement releva de la classe 6 (50 à 71 %) pour 1/3 des cours d'eau et de la classe 7 (72 à 97 %) pour 4/10, et, il n'y eut pas de croissance inférieure à 33 % de l'année précédente. S'il est vrai que l'E.S.T., bien que restant modeste, s'est accru dans trois cas sur quatre, et que la classe 6 (22 à 47 %) est la plus représentative, quelques bassins versants ont connu un repli de l'écoulement

des sources, (classes 4 à 1 = 0 à -106 %), mais - 106 % sur le Gijou à Vabre (affluent de l'Agout, dans le Tarn) est exceptionnel.

Pour la plupart d'entre eux, il s'agit de bassins versants aquicludes, aux sols minces, où le ruissellement des pluies l'emporte sur l'infiltration. C'est une remarque qui confirme leur dangerosité : la faible protection d'un sol imperméable, dans un contexte de forte énergie du relief, peut déclencher une crue brutale, à la suite d'une averse brève et abondante que le sol est incapable d'absorber (la Têt en 1940, Nîmes en 1988, Vaison-la-Romaine en 1992, les Corbières en 1999, le Paillon en 2015).

IV. LE RISQUE HYDROLOGIQUE EST INCONTOURNABLE

La Banque Hydro dispose des données de 950 bassins entrant dans les limites du drainage que nous avons retenu ($500 \text{ km}^2 > \text{drainage} > 100 \text{ km}^2$). La plupart sont des sous-affluents de la Seine, de la Loire, de la Dordogne, de l'Adour, du Rhône, de la Meuse ou de la Moselle. Dans ce cas, le destin de leurs sources est d'assurer la pérennité des débits, et celui de leur E.R.C. d'y occasionner des inondations, car c'est au niveau de ces petits bassins versants, dont « l'ordre » des chenaux ne dépasse pas 5, que naissent les inondations.

A. Les inondations issues du ruissellement

Elles constituent le risque majeur de la plupart des régions métropolitaines, du fait de la saturation du bassin versant, soit après un long épisode

pluvieux d'origine cyclonique venu de l'Atlantique Nord, soit par l'occurrence d'orages dont les plus dangereux sont les averses méditerranéennes de l'automne. Les bassins aquicludes seront alors les plus concernés.

1. Les Massifs Anciens océanisés sont à la source des grandes crues

Nous avons retenu quatre exemples : la Gorre (sous-affluent de la Loire) et la Corrèze (sous-affluent de la Dordogne) en Limousin, d'une part, l'Aven et le Léguer en Massif Armoricain, d'autre part. La Figure 12 y illustre la forte croissance de l'E.R.C. pendant l'année hydrologique 1976-1977. Les taux de ruissellement qui, en moyenne, avaient dépassé 70 % (classe 6 : Figure 8.a), ont crû de 50

à 97 % (classe 6 et 7 : Figure 8.b) entre 1975-76 et 1976-77. La transition entre déficit et abondance pluviométrique s'accompagna d'un recul du tarissement des sources. Enfin, l'allure des quatre hydrogrammes traduit une immodération liée aux mêmes épisodes pluvieux car les pointes de crues sont simultanées : septembre, octobre et décembre 1975, février et mai 1976 et surtout octobre, novembre et décembre 1976 suivis de l'hiver 1977.

➤ En Limousin, les E.R.C. de la Gorre et de la Corrèze qui avaient été 1,7 et 2,7 fois supérieurs à l'E.S.T. en 1975-1976, ont été multipliés par 3,5 l'année suivante : E.R.C. = 8,4.E.S.T. sur la Gorre et 6,8.E.S.T. sur la Corrèze.

➤ Le Massif Armoricain ne connut pas ces excès et nous avons mesuré, en moyenne, E.R.C. = 0,8.E.S.T. sur le Léguer et

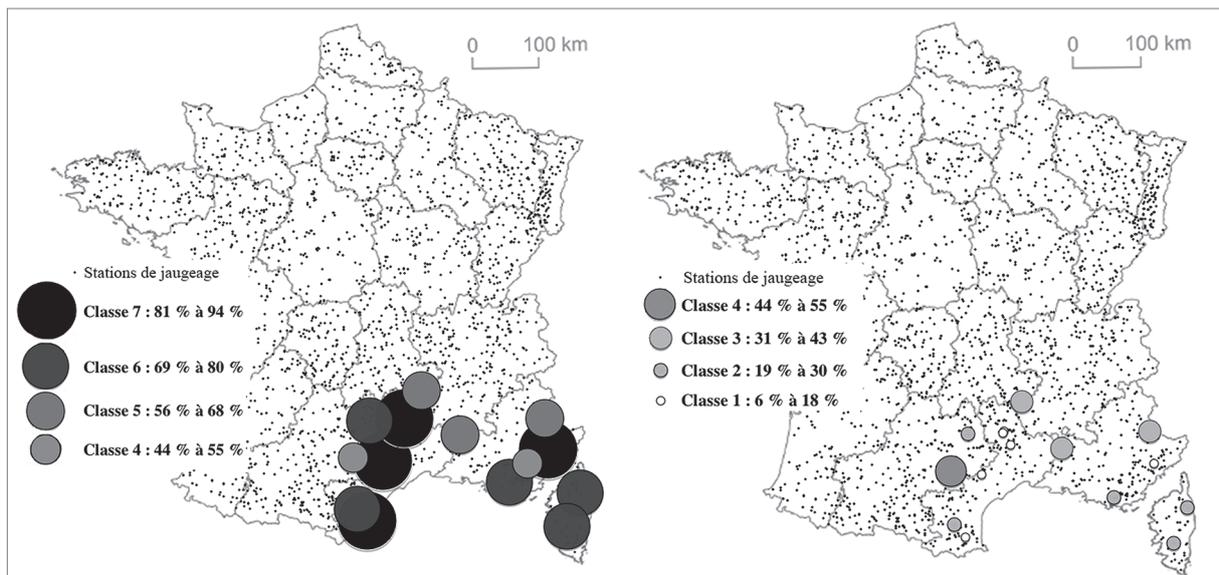


Figure 11.a. Bassins versants méditerranéens - L'ampleur de l'E.R.C. (à gauche) face à l'indigence de l'E.S.T. (à droite)

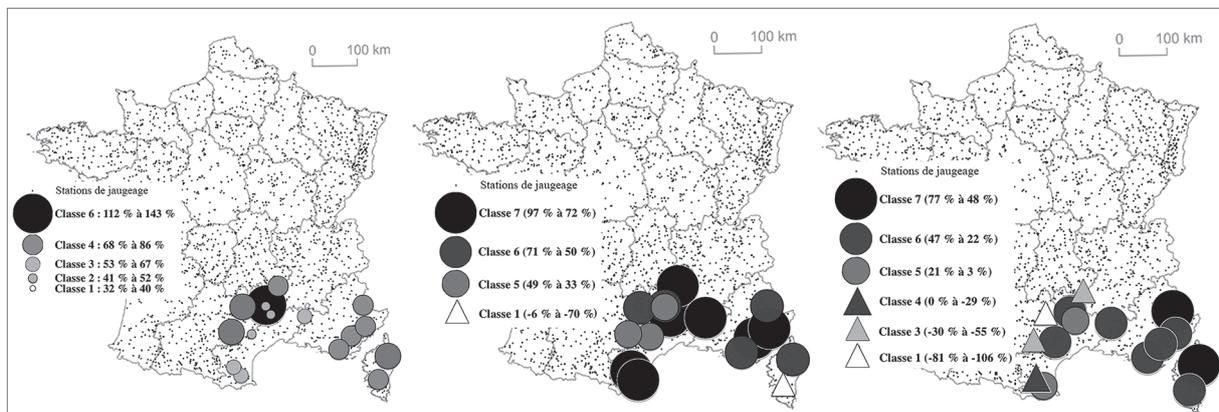


Figure 11.b. Bassins versants méditerranéens - L'augmentation des précipitations resta modeste (à gauche) mais cela suffit à emballer l'E.R.C. (au centre) et l'E.S.T. (à droite), mais dans une moindre mesure

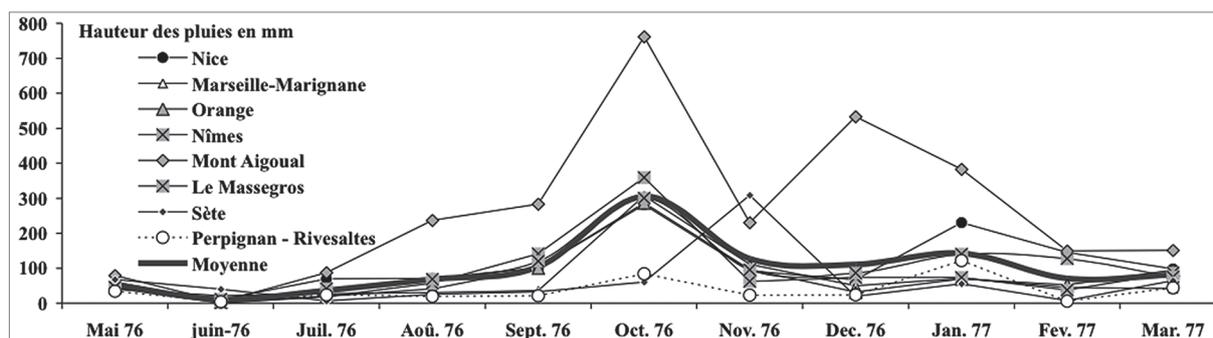


Figure 11.c. Bassins versants méditerranéens - Variations mensuelles des précipitations méditerranéennes de mai 1976 à mars 1977

E.R.C. = 0,6.E.S.T. sur l'Aven. Au cours d'une année « sèche », l'E.S.T. l'emportait du fait d'un déficit pluviométrique estival marqué, associé à une E.T.R. accentuée par les besoins d'une agriculture intensive. Mais l'année suivante l'E.R.C. l'emporta : E.R.C. = 9,4.E.S.T. sur le Léguer et 5,5.E.S.T. sur l'Aven. En une année, on passa d'un ruissellement « déficitaire » à une situation de crue.

Mais que l'activité humaine soit favorable au ruissellement (plantations dans le sens de la pente, labours en saison froide) ou moins propice (reboisement et engazonnement), les bassins versants « hercyniens » ont toujours répondu rapidement aux précipitations. En 1982, en Auvergne et en Limousin, saturés par les perturbations pluvieuses, l'E.R.C. des centaines de petits bassins versants provoqua deux crues

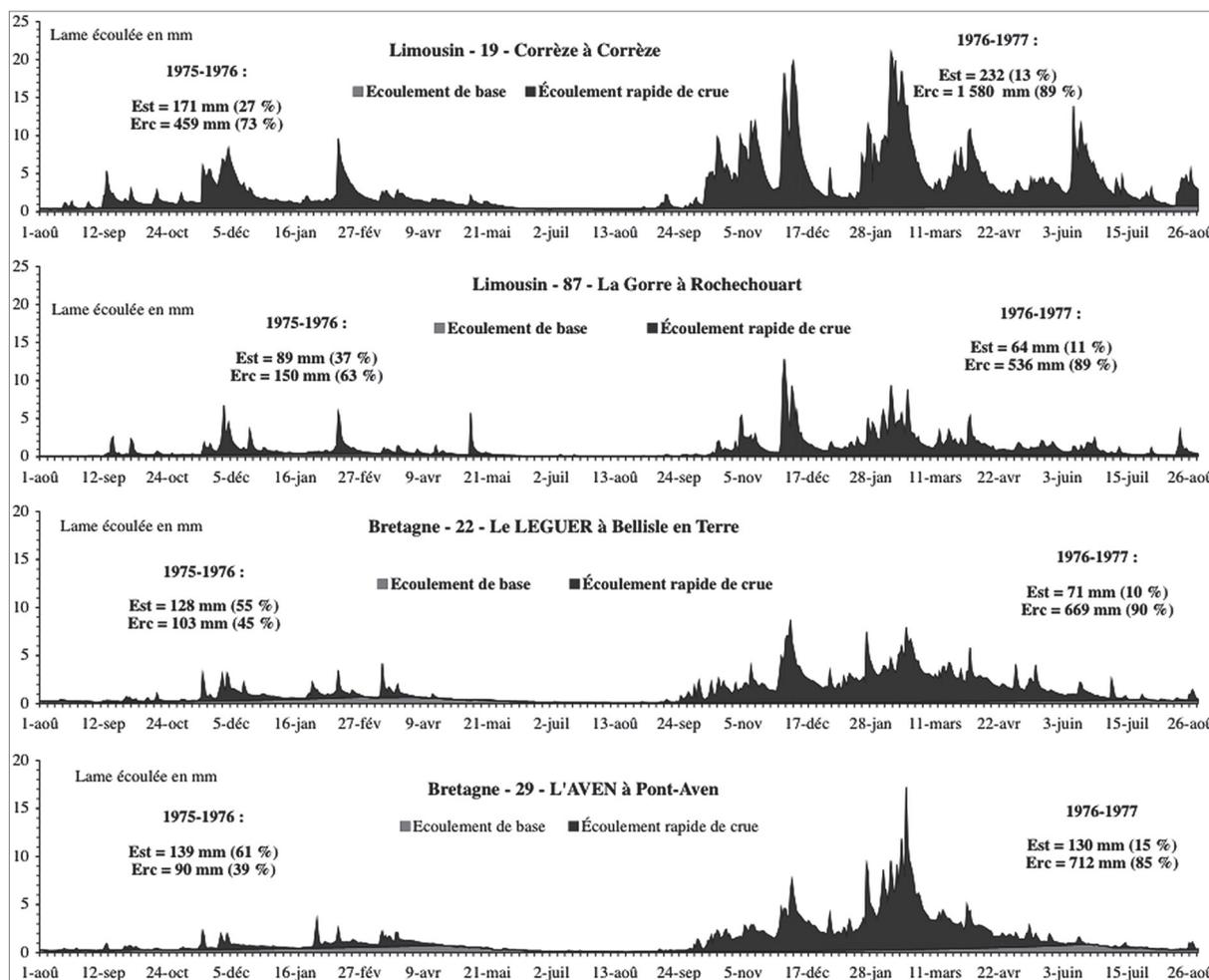


Figure 12. Massifs anciens : quatre cours d'eau à risque de crues

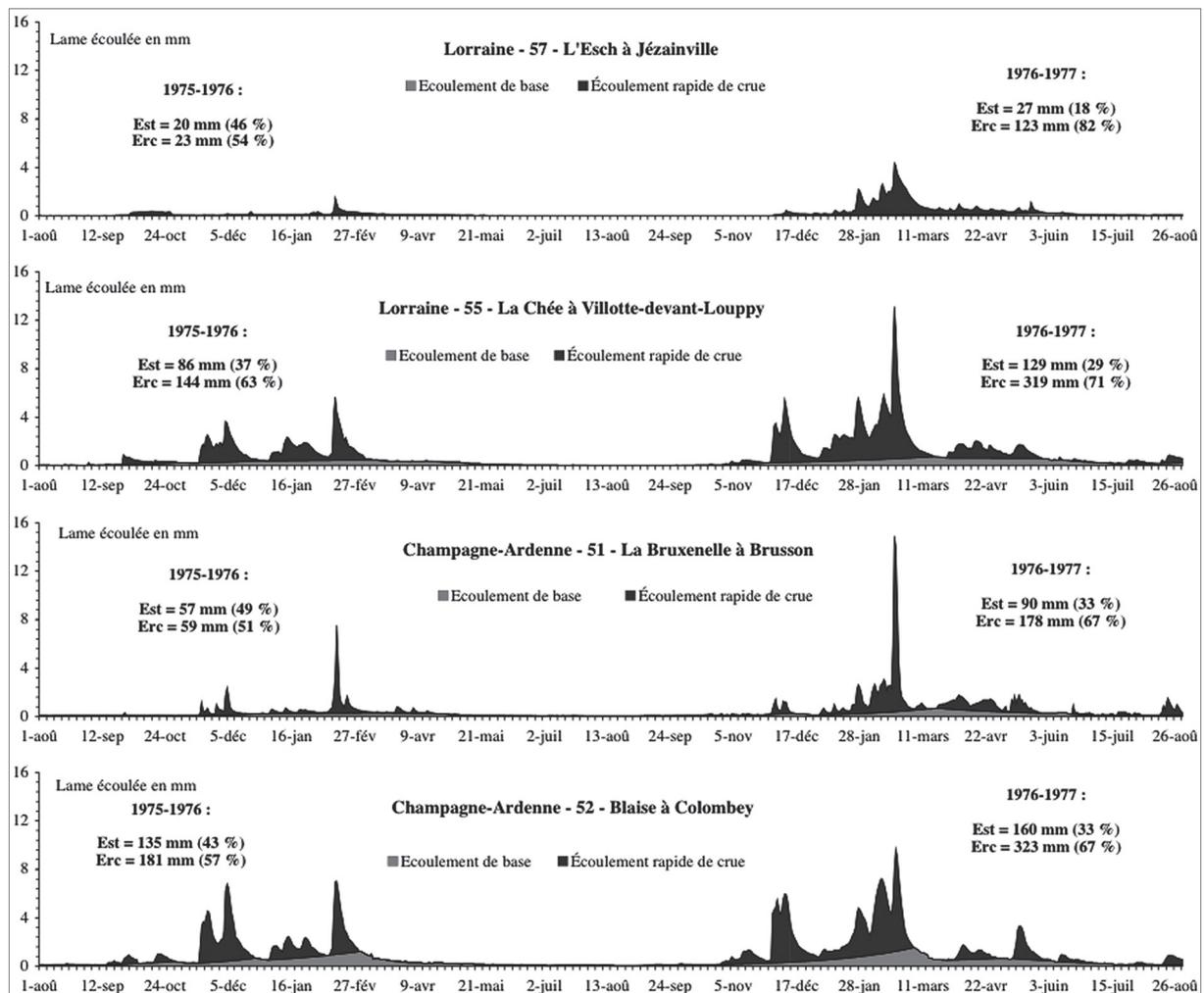


Figure 13. Est du Bassin de Paris : quatre cours d'eau à risque de crues

océaniques le 13 janvier et le 23 décembre : il n'y a pas eu d'inondation grave, mais on avait atteint la crue cinquantennale : 2 840 et 2 270 m³/s à Giens, 2 810 et 2 300 m³/s à Blois. Aujourd'hui, on a lutté contre la torrencialité, mais la sensibilité de la structure hydrologique reste réelle sur les massifs anciens : les quatre hydrogrammes prouvent que l'occurrence de longs épisodes pluvieux aboutit à un écoulement de crue exacerbé, à l'image des crues récurrentes de la Vilaine à Redon, de l'Ellée à Quimper.

2. Les Bassins sédimentaires ne sont pas à l'abri, ce que soulignent les hydrogrammes de l'Esch, un sous-affluent de la Moselle, de la Chée, de la Bruxenelle et de la Blaise, des sous-affluents de la Seine (Figure 13). Ces cours d'eau, issus des plateaux calcaires de la Lorraine et de la Champagne, illustrent ces petits bassins versants à fort ruissellement qui drainent pourtant une sédimentation carbonatée. En Champagne et en

Lorraine, la structure hydrologique est favorable à l'E.R.C., lequel peut représenter une part importante de l'écoulement (Figure 9.a) et sa discrétisation place les bassins dans les classes 5 et 6. Si l'E.S.T. s'est accru après 1976, c'est surtout le ruissellement qui profita de l'accroissement pluviométrique.

➤ Sur le plateau lorrain, l'E.R.C. de l'Esch (dont l'E.S.T. fut stable) a presque doublé. Elle représente le modèle de ces petits cours d'eau qui participent aux crues de la Moselle et de la Meuse (Charleville-Mézières en 1995).

➤ La Chée et la Bruxenelle drainent le Barrois et la Blaise dévale du Plateau de Langres. L'E.R.C. n'avait été respectivement qu'1,7, 1,0 et 1,3 fois supérieur à l'E.S.T. en 1975-1976. Dès l'automne 1976, les proportions augmentèrent : E.R.C. = 4,6.E.S.T. sur la Chée, 2.E.S.T. sur la Bruxenelle et la Blaise. Ce fut suffisant pour que des centaines de petits cours d'eau génèrent une inondation en aval.

➤ Du 30 janvier au 4 février 1955, à Paris, la Seine débitait plus de 1 400 m³/s, du fait de la saturation, par des mois de pluies, de centaines de petits bassins versants sur le Loing, l'Yonne, la haute Seine et la Marne. L'hypothèse d'un ruissellement sur les revers des cuestas lorraines et champenoises a conduit à la création des Grands Lacs de Seine censés contenir l'E.R.C. des multiples sous-affluents.

3. On ne peut pas éluder les crues cévenoles

Le Loup servira de modèle à la Provence, le Gardon et la haute Loire aux Cévennes et la Canterrane aux Pyrénées Orientales.

➤ Sur le Loup, le Gardon et la Canterrane, la réponse des bassins versants à tout type d'averses se traduit par un E.R.C. dominant (classe 6 à 7 : Figure 11). Même en 1975-76, nous avons calculé E.R.C. = 4,6.E.S.T. sur le Loup, 6,3.E.S.T. sur le Gardon et 5,7.E.S.T. sur la Canterrane. Par la

suite, le multiplicateur passa respectivement à 10,4, 18,8 et 8,8. La Canterrane est un « oued » où l'écoulement n'a lieu qu'épisodiquement, mais à près de 90 % sous la forme d'un E.R.C.

➤ Cet écoulement torrentiel relève d'averses de type cévenol sur une structure hydrologique favorable : relief énergique, rareté du couvert végétal (incendies à répétition) et héritage mal cicatrisé d'une mauvaise gestion agropastorale. Urbaniser la plaine alluviale du Paillon, à Nice ou du Vidourle, à Sommières, ne pouvait qu'aboutir à une situation dramatique.

Déjà en 1975-1976, les 2/3 de l'écoulement de la Loire à Issarlès relevaient de l'E.R.C. L'année suivante, elle connut 14 pointes de crue entre septembre et juin, et les 3/4 de la lame d'eau de 2 172 mm concernèrent l'E.R.C. C'est un risque récurrent, et à la suite d'une averse cévenole, le module qui n'était que de 13 m³/s le 13 septembre 1980 à Brives-Charensac grimpa à 1 756 m³/s le lendemain. La Loire rompit ses levées à Saint-Laurent-la-Conche, faisant huit victimes

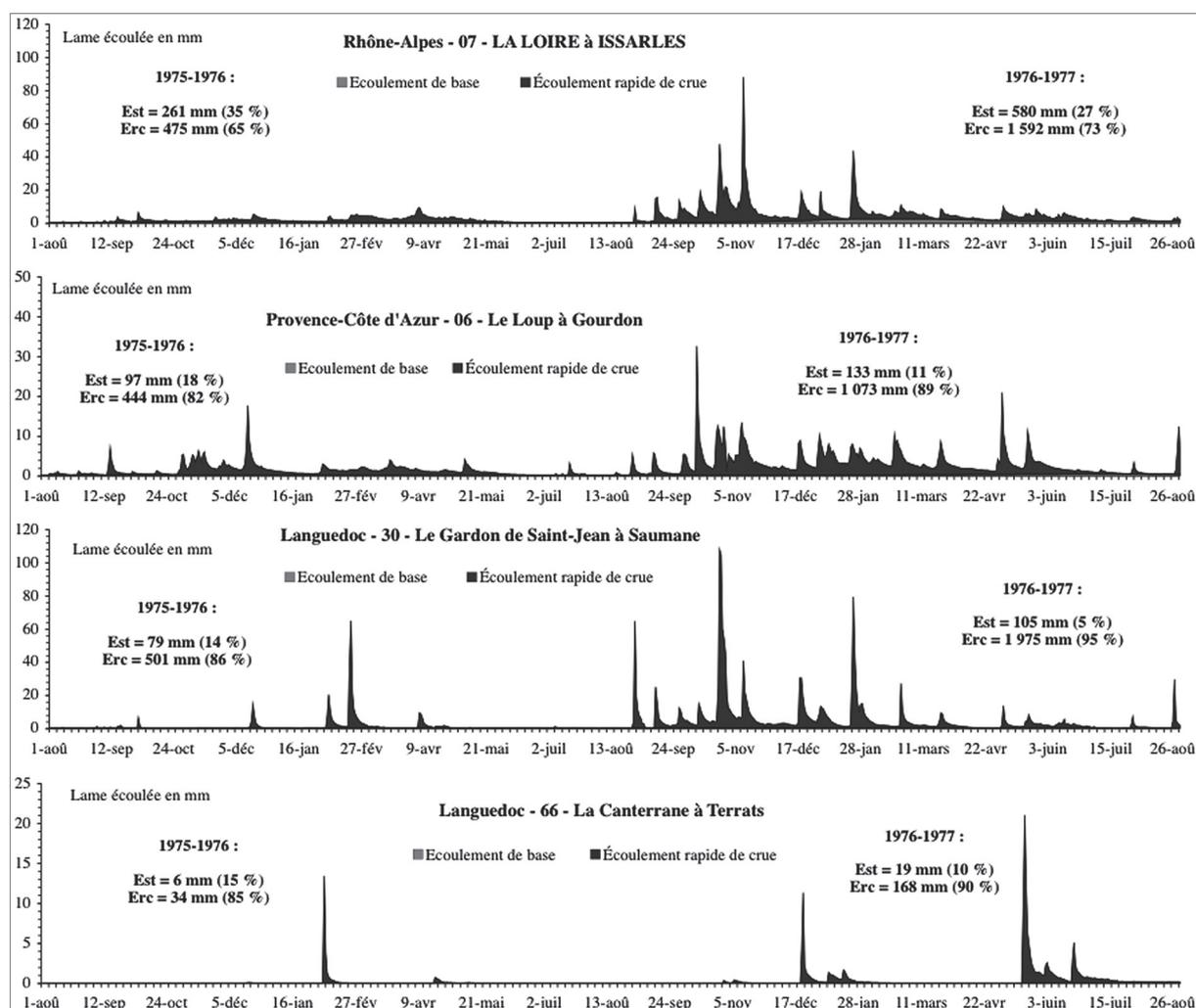


Figure 14. Le sud méditerranéen : l'omnipotence de l'écoulement rapide de crue

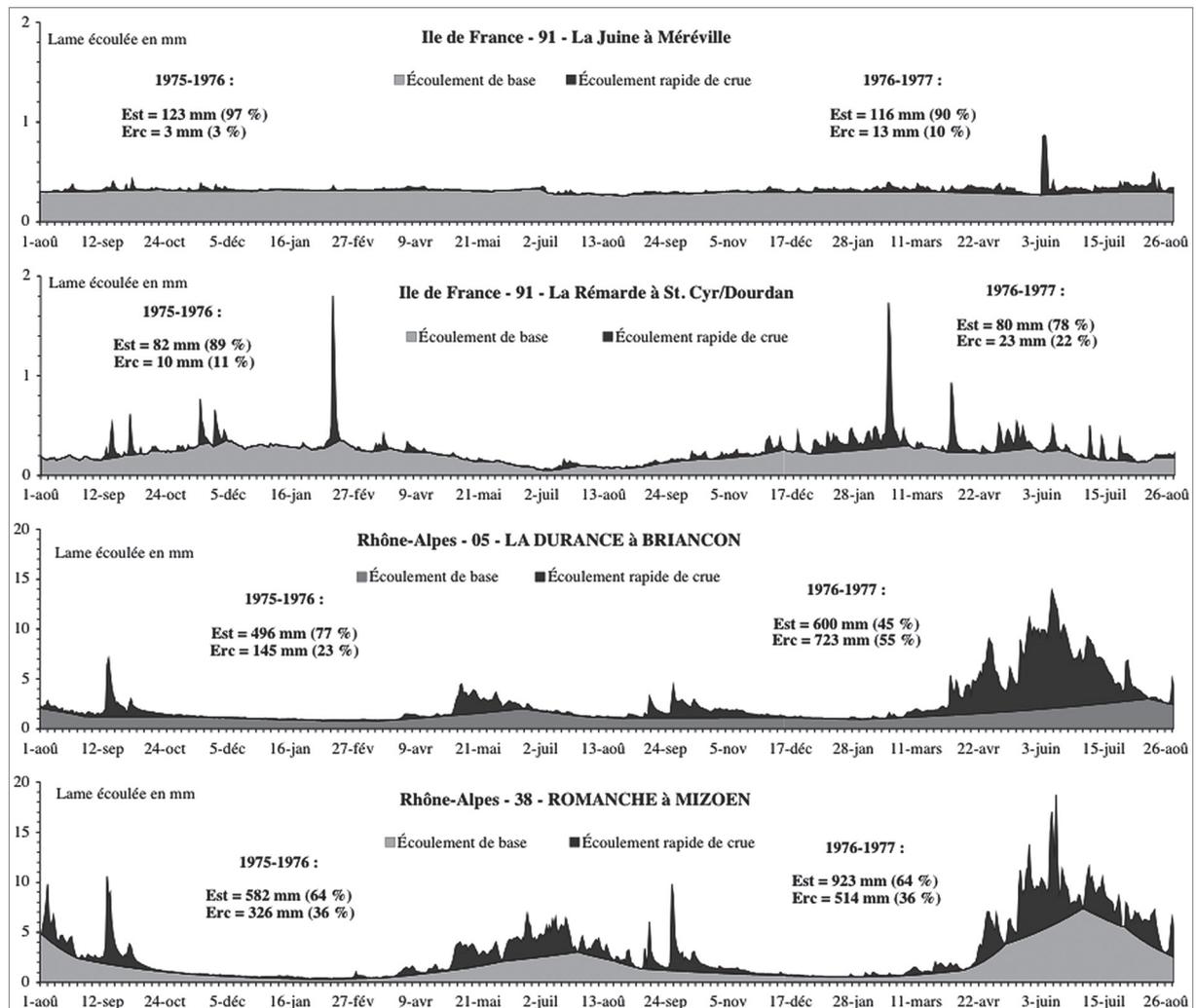


Figure 15. Les rares cours d'eau à réserves souterraines

dont deux enfants. On sait que ce type d'événement peut se produire sur la Loire amont et sur l'Allier. On sait aussi qu'une occurrence simultanée avec un bassin versant saturé par des précipitations peut multiplier le débit de l'E.R.C. et conduire à une crue cataclysmale comme en 1856.

B. La pérennité de l'écoulement et le soutien de l'étiage

Ces mêmes cours d'eau sujets au ruissellement peuvent être soumis à des étiages prononcés au cours des pulsations pluviométriques « sèches » : années 1940, 1970 et 1990. Cette situation est préjudiciable à l'agriculture et à l'alimentation urbaine et touristique, notamment en milieu méditerranéen (Figure 14). Mais les cours d'eau du Bassin de Paris (Figure 13) et des massifs anciens (Figure 12) ont connu des basses eaux interminables, ce qui a conduit à des pompages profonds

(plateaux calcaires) et à des retenues collinaires (Bretagne, Limousin). Mais la décomposition des hydrogrammes a montré que deux types de bassins possèdent des réserves leur permettant d'assurer l'E.S.T. en toute saison (Figure 15).

➤ En Île-de-France (Figure 9), la Juine est un cas d'espèce ; même en 1976-77, l'E.S.T. dépassa 90 % du total écoulé. Sur la Rémarde, l'E.R.C. s'accroît à l'automne 1977, mais il n'atteint que 22 % du module en 1976-77. Fréquents dans le centre du Bassin de Paris, ces cours d'eau étaient très pondérés et pérennes. Ces réserves ont attiré l'attention, et le « syndrome de la sécheresse de 1976 » occasionna une frénésie des pompages agricoles qui alla jusqu'à y créer un étiage artificiel.

➤ Dans les Alpes cristallines, la Romanche et la Durance sont de régime glacio-nival avec un étiage hivernal par rétention solide et un écoulement complexe à partir du printemps : fonte des neiges et des glaciers, pluies estivales. Le rôle

des précipitations s'est traduit par un enneigement supérieur en 1976-77 et un E.R.C. qui s'accrut du fait des débâcles. Mais, en valeur absolue, l'E.S.T. (fonte du glacier) s'est accru. Aussi ces eaux sont largement sollicitées pour le maintien en eau des réservoirs hydroélectriques.

Sur le court terme, les réserves glaciaires sont indépendantes de la météorologie, et leur débit ne dépend que des températures. À moyen terme, une augmentation des températures accroîtrait leur part dans l'écoulement, mais, à long terme, on peut redouter un recul de l'enneigement et une diminution rapide des volumes des glaces.

Mais les crues ne sont pas à écarter. La présence d'une couche superficielle est facile à saturer sur la Rémarde. Les averses méditerranéennes furent un risque récurrent sur la Durance. Somme toute, les cours d'eau français restent plutôt favorables à l'apparition du ruissellement.

V. CONCLUSION

Nous n'avons pas eu la prétention de mettre au point une procédure de prévision des processus d'écoulement. Ce n'est pas un modèle mathématique, mais un moyen de quantification des deux principaux modes d'écoulement qui se trouvent associés dans les modules journaliers. Sa généralisation à 91 cours d'eau donne une image du rôle de la nature du sol et du sous-sol, de l'énergie du relief et de l'aménagement de l'espace. En effet, les conséquences d'un reboisement, d'une intensification de l'agriculture ou de l'imperméabilisation du sol (bétonnage, urbanisation) peut avoir modifié les relations entre l'E.S.T. et l'E.R.C. Or, la structure hydrologique et les aménagements sont des événements faciles à observer et à utiliser ou à combattre. Une décomposition des hydrogrammes sur une plus longue période (30 à 50 ans) permettrait de définir les moyens à mettre en œuvre pour prévenir les effets tant d'une urbanisation d'un espace rural, que du reboisement d'une zone de déprise agricole ou inversement de l'intensification de la production. Une meilleure connaissance de réactions d'un bassin versant, face à l'erratisme des précipitations, éviterait le renouvellement d'aménagements intempestifs, autant face au risque d'inondation que du manque d'eau. Enfin, une bonne connaissance de

la part des écoulements de crue et des écoulements souterrains entre en jeu dans celle du transfert des pollutions. C'est une procédure qui aurait sa place dans un Plan Local d'Urbanisme, par exemple. Mais elle est très lourde à mettre en place. Je n'ai jamais pu convaincre un étudiant de Master ou un thésard d'y avoir recours. Elle demandait trop d'investissement en temps.

BIBLIOGRAPHIE

- Ambroise, B. (1990). *Méthodes d'étude de la variabilité spatiale du cycle hydrique dans le petit bassin du Ringelbach*. Actes Conférence Internationale sur les Ressources en Eau en Région Montagneuse (AIH-AISH), Lausanne, Suisse.
- Ambroise, B. (1995). Hydrologie des petits bassins versants ruraux en milieu tempéré, processus et modèle. *Les flux dans les volumes pédologiques et à leur limite : approches à l'échelle spatiale du bassin versant*. Séminaire du conseil scientifique du département Science du Sol (INRA), Dijon, France.
- Bravard, J.P., Petit, F. (1997). *Les cours d'eau - Dynamique du Système fluvial*. Paris : Armand Colin, 222 p.
- Cosandey, C., (1986). De l'origine de l'écoulement rapide de crue, dans un petit bassin versant forestier breton. *Z. Geomorph. N.F.*, 60, 177-186.
- Cosandey, C. (1990). L'origine des crues dans les bassins versants élémentaires. *Ann. Géo.*, 556, 641-659.
- Cosandey, C. (1995). La forêt réduit-elle l'écoulement annuel ? *Ann. Géo.*, 581-582, 7-25.
- Cosandey, C. (1999). *Genèses des crues cévenoles dans les bassins élémentaires : l'exemple du bassin de la Latte (versant sud du mont Lozère)*. Colloque SHF « Crues de la normale à l'extrême », Lyon, France.
- Cosandey, C., Boudjelmene, D., Roose, E., Lelong, F. (1990). Étude expérimentale du ruissellement sur des sols à végétation contrastée du Mont Lozère. *Zeit. für Geomorph.*, 34(1), 6177.
- Cosandey, C., Didon-Lescot, J.F. (1990). Étude des crues cévenoles: conditions d'apparition dans un petit bassin forestier sur le versant sud du Mont Lozère, France. *IAHS Publ.*, 191, 103-115.
- Fritsch, J.M. (1992). *Les effets du défrichement de la forêt amazonienne et de la mise en culture sur l'hydrologie de petits bassins versants*. Thèse de doctorat, Université de Montpellier 2, France.
- Giret, A. (1991). Rapports entre l'écoulement et les précipitations sur le bassin du Né - Géo-Centre-Ouest. *Ass. Géogr. Centre-Ouest*, 3, 43-55.
- Giret, A. (1991). *Le problème de l'eau sur le glacis des Mauges : exemple du bassin versant de l'Hyrome - Mélanges en hommage au professeur A. BOUHIER*. Centre de Géographie humaine et sociale, Poitiers, pp. 361-377.

- Giret, A. (1992). *Bassins hydrographiques comparés dans le Centre-Ouest de la France*. Thèse de doctorat, Université de Paris X, France.
- Giret, A. (1993). Fonctionnement hydrologique des altérites et des sols sur le Glacis des Mauges (Maine et Loire). *Quaternaire*, 4(2-3), 111-118.
- Giret, A. (1994). Bilan hydrologique et milieu naturel (Brenne et Cisse). *NOROIS*, 162, 293-313.
- Giret, A. (1996). Contribution à l'analyse des décrues et des tarissements dans la connaissance des réserves hydrologiques : l'exemple de l'Envigne entre 1968 et 1994. *Sécheresse*, 7(4), 253-268.
- Giret, A. (1998). Rôle du paysage naturel dans l'occurrence des crues : l'exemple de l'Envigne: un affluent poitevin de la Vienne. *NOROIS*, 179, 543-566.
- Giret, A. (1999). 1971-1976 et 1989-1992 : deux anomalies de l'écoulement dans le Poitou-Charentes: exemple de l'Envigne. *Sécheresse*, 10(2), 105-115.
- Giret, A. (2004). Anthropisation de l'écoulement en Poitou-Charentes : deux méthodes d'analyse. *NOROIS*, 193, 61-76.
- Giret, A. (2016). *Ruissellement et écoulement des eaux sur les bassins versants français*. L'Harmattan, 200 p.
- Gischer, L., Hallot, E., Houbrechts, G., Van Campenhout, Petit, F. (2012). Analyse des débits en période de tarissement : essai d'une typologie régionale appliquée à des rivières du bassin de la Meuse (Belgique). *BSSLg*, 59, 59-80.
- Grésillon, J.-M. (1994). *Contribution à l'étude de la formation des écoulements de crue sur les petits bassins versants*. Diplôme d'habilitation, Université de Grenoble, France.
- Hewlett, J.D., Hibbert, A.R. (1967). Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In Sopper, W.E. & Lull, H.W. (dir.), *Pergamon Forest hydrology* (pp.275-290).
- Kirkby, M.J. (1969). Infiltration, Throughflow, and Overland Flow. In Chorley, R.J.(dir.), *Fluvial process*, London : Methuen and Co LTD.
- Lambert R. (1995). *Géographie du cycle de l'eau*. P.U.M, Toulouse, 438 p.
- Maillet, E. (1906). La vidange des systèmes de réservoirs. *An. Ponts et Chaussées - Mém. et Doc.*, 21, 8 p.
- Maire, G. (1981). *L'hypodermisme dans le bassin de la Bruche. Mélanges offerts à Ch. P. Péguy*. Grenoble, pp. 535-541.
- Mérot, Ph., (1993). *Contribution à l'étude du rôle du sol dans le fonctionnement hydrologique de bassins versants*. Mémoire de diplôme d'habilitation à diriger des recherches, Université de Rennes 1, France.
- Obled, C. (1999). *Le versant et le bassin versant : quelques aperçus sur la formation des crues et la production du ruissellement*. Colloque SHF « Crues de la normale à l'extrême », Lyon, France.
- Ogunkoya, O.O., Jenkins, A. (1993). Analysis of storm hydrograph and flow pathways using a three-component hydrograph separation model. *J. Hydrol.*, 142, 71-88.
- Perrin, J-L., Bouvier, C., Janeau, J.L. (1999). Mécanismes de production des crues sur un petit bassin montagneux périurbain, Quito (Equateur). Colloque SHF « Crues de la normale à l'extrême », Lyon, 45-54.
- Sherman, L.K. (1932). Stream Flow from Rainfall by the Unitgraph Method. *Engineering News Record*, 108, 501-505.

Coordonnées de l'auteur :

Alain GIRET
 Professeur de Géographie Emérite
 Université de Paris 13
 agiret@wanadoo.fr