



THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE PARIS 6

Ecole doctorale : Géosciences et Ressources Naturelles

Spécialité : Hydrologie

présentée par

Vazken ANDRÉASSIAN

Ingénieur du Génie Rural, des Eaux et des Forêts

pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université Paris 6

Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants

TOME 1

Thèse soutenue le 24 Septembre 2002 à l'ENGREF devant le jury composé de :

Prof. Ghislain de Marsily

Dr. Eric Parent, ICGREF

M. Claude Michel, ICGREF

Prof. Roman Krzysztofowicz

Dr. Jean-Marie Fritsch

Prof. Katia Laval

Dr. Serge Rambal

Dr. Claude Millier

Dr. Pierre-Alain Roche, ICPC

M. Denis Ballay, IGGREF

Co-directeur de thèse

Co-directeur de thèse

Co-directeur de thèse

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Examineur

Examineur

Invité

Invité

Résumé

Le thème du changement de l'aptitude des bassins versants à transformer la pluie en écoulement utilisable par l'homme est un souci récurrent pour les gestionnaires de la ressource en eau. Nous nous y intéressons dans cette thèse, dans le cas du Massif central, où l'on observe depuis l'après-guerre une évolution régulière des terres agricoles marginales vers le reboisement.

Cette thèse poursuit trois objectifs principaux :

- comprendre l'origine du débat actuel sur le rôle hydrologique des forêts ;
- évaluer la capacité des outils dont nous disposons à détecter des changements dans le comportement hydrologique des bassins versants ;
- étudier le lien possible entre non stationnarité hydrologique et évolution forestière dans le Massif central.

Le premier objectif est atteint par une étude historique, où nous nous intéressons en particulier au débat engagé entre forestiers et ingénieurs, qui s'étend sur la totalité du 19^{ème} siècle. Nous interprétons ce débat au travers des résultats expérimentaux obtenus tout au long du vingtième siècle, notamment par les forestiers américains.

Nous menons ensuite une réflexion concernant les possibilités offertes par les outils hydrologiques pour détecter les changements du comportement des bassins versants. Cette réflexion s'appuie sur une étude de la sensibilité des modèles pluie-débit à leurs données d'entrée (pluie et ETP), où nous montrons que les modèles analysés sont peu sensibles aux variations spatiales de l'ETP, mais qu'ils réagissent en revanche positivement à une amélioration de la qualité d'estimation de la pluie de bassin, tout en manifestant une certaine adaptabilité vis à vis de cette estimation. Nous mettons ensuite au point une série de tests de détection de tendances au sein du comportement hydrologique des bassins, que nous validons sur des cas d'écoles issus de la littérature hydrologique : bassins versants expérimentaux du Réal

Résumé

Collobrier, en France, de Coshocton, Andrews Experimental Forest et Three Bar aux Etats-Unis.

Enfin, nous appliquons ces tests à un échantillon de 63 bassins versants du Massif central. Nous mettons alors en évidence une très forte proportion de bassins versants non-stationnaires, notamment en ce qui concerne l'écoulement total et l'écoulement en crue (avec respectivement 33% et 16% des bassins non-stationnaires).

En parallèle et de façon indépendante, nous avons obtenu des indicateurs d'évolution du couvert forestier pour un sous-échantillon de 34 bassins versants, en utilisant les photographies aériennes et les relevés de terrain de l'Inventaire Forestier National. De fortes évolutions du couvert forestier étant observées, nous avons donc recherché un lien avec l'évolution des comportements hydrologiques, qui confirmerait les résultats obtenus sur de nombreux petits bassins versants expérimentaux.

L'analyse statistique n'a fait apparaître aucun lien significatif, et nous concluons que pour notre zone d'étude et à l'échelle à laquelle nous avons travaillé (bassin de 5 à 90 km²), une évolution graduelle du couvert forestier n'a pas de conséquence détectable sur le comportement hydrologique des bassins versants. Nous montrons cependant que l'occurrence de fortes non-stationnarités est restreinte aux bassins versants peu boisés, ce qui pourrait laisser penser que la forêt a un rôle tampon sur des changements dont l'origine n'a pu être déterminée.

Abstract

Watersheds transform rainfall into runoff, turning diffuse rainfall into a concentrated water resource which can easily be used by Man. Possible water yield changes are feared by watershed managers across the world. In this thesis, we focus on the hydrological impact of land-use changes in the Massif Central highlands of France, where forestlands have been gradually replacing marginal farmlands since the end of World War II.

This thesis pursues three objectives:

- to understand the historical roots of the current debate on the hydrological role of forests;
- to assess the ability of current hydrological tools to detect changes in the hydrological behavior of watersheds ;
- to study the link between hydrological non-stationarity and forest cover evolution in the Massif Central highlands.

We reach our first objective through an historical study, in which we focus on the debate between foresters and engineers during the 19th century in France. We interpret this debate using the results of modern hydrology, especially the experimental results that American foresters obtained in the 20th century.

Then, we assess the possibilities offered by hydrological models to detect watershed behavior changes:

- we conduct a sensitivity study, to assess rainfall-runoff model sensitivity to input data (rainfall and PE). In this sensitivity study, we show that models are rather insensitive to PE variability, but that they react positively to an improvement of quality of their rainfall estimate. However, they still hold the capacity to adapt to systematic biases in the rainfall input estimate.
- Then, we present a series of statistical tests, which aims to identify trends in the hydrological behavior of watersheds. These tests are validated on well-

Abstract

known case studies: Réal Collobrier (France), Coshocton, Andrews Experimental Forest and Three Bar (US) experimental watersheds.

Last, we apply these tests to a sample of 63 watersheds in the Massif Central highlands. There appears to be a non-negligible proportion of non-stationary watersheds, especially as far as the total runoff and flood runoff are concerned (with respectively 33% and 16% of non-stationary watersheds in our sample).

In parallel (and independently of the above), we obtain indicators of forest cover evolution on a sub-sample of 34 watersheds, using aerial photographs and field surveys of the *Inventaire Forestier National*. Strong evolutions of forest cover are identified, and we thus look for a possible link with hydrological behavior changes, which would confirm the results obtained on small experimental watersheds.

Statistical analysis does not show any significant link, and we conclude that in our study area and at the scale that we investigated (watershed areas between 5 and 90 km²), a gradual evolution of forest cover has no detectable impact on watershed behavior. We show, however, that large non-stationarities only occur in those watersheds with limited forest cover, which leads us to hypothesize that forest may have a buffering role in hydrological changes, even though we could not identify these changes.

Remerciements

S'il n'y avait pas eu le risque de passer pour un ingrat, j'aurais préféré m'abstenir de remerciements, tant le risque de commettre une injustice en oubliant quelqu'un est grand. Je précise donc d'emblée que cette liste ne présente aucun caractère d'exhaustivité.

Je souhaite tout d'abord remercier mes deux directeurs de thèse et les membres du jury :

- Ghislain de Marsily, pour sa gentillesse et son ouverture d'esprit, qui l'a poussé à porter de l'intérêt à ce que les hydrogéologues qualifient habituellement assez négligemment de « pertes » (c'est à dire, les débits de surface) ;
- Eric Parent, pour son amitié, ses compétences et sa patience ;
- Jean-Marie Fritsch et Roman Krzysztofowicz, qui ont été rapporteurs de ce travail, et ont permis que soient dignement représentés l'un, l'hydrologie forestière et l'autre, la nation arménienne ;
- Katia Laval, Claude Millier, Serge Rambal, Pierre-Alain Roche et Denis Ballay qui m'ont fait l'honneur d'être membres du Jury.

Un comité de suivi de thèse comprenant Sylvie Durrieu, Michel Meybeck, Eric Parent, Bruno Rambaldelli, Pierre Ribstein et Christian Scherer avait été constitué. Je remercie les membres de ce comité, dont les conseils m'ont beaucoup encouragé.

Cette thèse s'appuie sur de longues séries de données, qui ont été mises à ma disposition par les organismes chargés de leur collecte ou de leur gestion. Je souhaite donc remercier :

- L'Inventaire Forestier National, et en particulier Jean Wolsack, Emmanuel Didon, Gêrôme Pignard, Sylvie Durrieu, Jean-Guy Bourreau, Daniel Lopez et Nabila Hamza ;
- La Direction de l'Eau du Ministère de l'Environnement et Christian Scherer ;
- Météo France et Bruno Rambaldelli ;

Remerciements

- L'Agricultural Research Service (North Appalachian Experimental Watershed, Coshocton, Ohio) et Vickie Dreher;
- H.J. Andrews Experimental Forest et son serveur web.

Certains organismes ont également apporté une contribution financière à cette recherche : le programme Risque d'Inondation du Ministère chargé de l'Environnement, et le Programme Environnement, Vie et Sociétés du CNRS.

Je souhaite à présent remercier tous mes collègues du Cemagref, notamment ceux de l'ex-division hydrologie, dont j'ai pu apprécier chaque jour la gentillesse : François Anctil (en visite), Patrick Ansart, Cécile Loumagne, Claude Michel, Michel Normand, Charles Perrin, Marine Riffard, Jean-Louis Rosique, Mamoutou Tangara, Sylvie Tonachella. Je sollicite leur indulgence relativement à mes performances d'animateur d'équipe... Il y a tout de même une consolation : si je n'ai pas réussi à trouver suffisamment de financement pour nos thésards, le travail de Safouane Mouelhi et de Ludovic Oudin s'annonce brillant. Merci à Sophie Morin pour la mise en page. Merci aussi à Thierry Leviandier et Jacques Joly de m'avoir engagé au Cemagref en 1995, et de ne pas m'avoir tenu rigueur de l'interprétation assez personnelle que j'ai faite du profil de poste qu'ils m'avaient présenté. Michel Poirson m'a pendant plusieurs années beaucoup aidé en Fortran, et je l'en remercie.

Le traitement des données forestières pour cette thèse a nécessité un travail considérable, qui a été très largement pris en charge par Mamoutou Tangara et Julien Muraz. Merci à Jean-Marie Monget (Ecole des Mines de Paris) et Annick Druel (Editions de la Boyère) pour leur aide en traitement d'images. Corinne Caugant m'a aussi aidé pour les premières interprétations de photographies aériennes.

La partie historique de cette thèse a reçu le soutien actif de Mesdames Dao et Michel au Cemagref d'Antony, de Mademoiselle Lionnet à l'ENGREF, de Sylvie Brochot au Cemagref de Grenoble, et de M. l'Académicien Pierre Zert à l'Académie d'Agriculture de France.

Les discussions sur l'hydrologie forestière que j'ai eues avec Claude Cosandey et Mike Bonell ont été toujours intéressantes.

Je souhaite pour finir souligner à quel point j'ai apprécié d'avoir rencontré et côtoyé trois personnes au cours de la dernière décennie :

- Eric Parent, qui m'a aidé à découvrir l'hydrologie forestière à l'Université d'Arizona, m'a offert une retraite à l'ENGREF et m'a encouragé (sans jamais désespérer) à finir cette thèse ;
- Claude Michel, qui m'a (presque) tout appris en hydrologie, tout en travaillant à me donner l'impression que je découvrais tout moi-même ;
- Charles Perrin qui m'a aidé, encouragé, entraîné et déménagé sans jamais se départir de son sourire.

Խենթուկ Ալիքին,

Քաղցր Թաղէին,

Իմաստուն Մանէին,

Համբերատար Թամարին,

եւ Մճճուրի լեռներէն իջնող կարկաչուն գետակներուն յիշատակին :

Sommaire

<i>Résumé</i>	3
<i>Abstract</i>	5
<i>Remerciements</i>	7
<i>Avant Propos</i>	13
<i>Introduction</i>	15
<i>Partie I - Eaux et Forêts : de la controverse historique au débat scientifique</i>	19
1 Histoire des idées sur le lien entre Eaux et Forêts.....	21
2 Une revue de la littérature scientifique du vingtieme siècle	47
Conclusion de la Première Partie	66
<i>Partie II - Comment identifier les modifications du comportement hydrologique liées à l'évolution du couvert forestier ?</i>	67
3 Constitution d'un échantillon de bassins versants.....	69
4 Etude du comportement hydrologique des bassins versants	83
Conclusion de la Deuxième Partie	93
<i>Partie III - Questions de modélisation hydrologique</i>	95
5 Impact de la mauvaise connaissance de la pluie	97
6 Sensibilité du modèle pluie-débit à la variabilité spatiale de l'Evapotranspiration Potentielle (ETP).....	127
Conclusion de la Troisième Partie	147
<i>Partie IV - Des indicateurs globaux pour décrire le couvert forestier et son évolution à l'échelle du bassin versant</i>	151
7 Comment caractériser l'évolution de l'occupation des sols ?.....	153
8 Obtention d'indices globaux d'évolution du couvert forestier a l'échelle d'un bassin versant.....	165
Conclusion de la Quatrième Partie	173

<i>Partie V - Identification de tendances au sein du comportement hydrologique des bassins versants</i>	175
9 Détection de non-stationnarités dans le comportement des bassins versants	176
10 Des cas d'école célèbres pour valider les tests de détection des tendances ...	195
Conclusion de la cinquième Partie.....	217
<i>Partie VI - Le couvert forestier peut-il expliquer la non-stationnarité des bassins versants du Massif central?</i>	219
11 Application des tests de détection de non-stationnarité à l'échantillon de 63 bassins versants du Massif central.....	221
12 Peut-on lier les tendances hydrologiques et forestières dans le Massif central ?	229
Conclusion de la sixième Partie.....	246
<i>Conclusion générale</i>	247
<i>Références bibliographiques</i>	253
<i>Table des matières</i>	263
<i>Table des figures</i>	269
<i>Liste des tableaux</i>	274

Avant Propos

La recherche scientifique progresse rarement par le consensus, plus rarement encore par des modèles fades mis en oeuvre par des chercheurs dont l'imagination est bridée par l'étroit champ d'investigation que leur offrent les chemins battus.

Nous n'avons pas cherché au cours de cette thèse à nous rallier aux concepts faisant consensus, à suivre les sentiers battus par d'autre. Nous nous sommes placés dans l'optique de deux grands hydrologues aujourd'hui disparus, l'un dans le domaine de l'hydrologie forestière (J.D. Hewlett), l'autre dans le domaine de la modélisation hydrologique (J.E. Nash).

Pour ce qui est de l'étude des influences forestières, nous avons suivi Hewlett qui écrivait en 1971 : « *The only method productive of quantitative estimates on a watershed scale seems to be the catchment experiment, supported to some extent by time trend analyses of streamflow data and correlation analyses of crude records from many drainage basins. [...] Theoretical or inductive conclusions about the tendency of forest stands to increase, or decrease, or not affect the quantity of water yielded by a natural drainage basin will never satisfy the watershed manager, or the public, until those conclusions have been demonstrated on a scale appropriate to the management problem; i.e., on a drainage basin large enough to serve as a primary water supply to a community or industry.* » Pour cette raison, nous avons préféré l'approche consistant à traiter un échantillon de bassins versants aussi large que possible, et avons renoncé à la tentation de construire un modèle physique sur un petit bassin expérimental.

Pour le choix de la démarche de modélisation, nous nous sommes ralliés à Nash et Sutcliffe, qui estimaient dès 1970 qu'il n'était pas approprié d'appliquer les lois de la physique pour représenter la transformation de la pluie en débit « *as there is little point in applying exact laws to approximate boundary conditions* ». La démarche qu'ils ont proposée pour mettre au point un modèle pluie-débit consistait à démarrer d'une

représentation très simple, et à ne complexifier ensuite le modèle que si la nécessité de cette complexification était démontrée : « *we are prepared to accept additional parts and hence greater difficulty in determining parametric values only if increased versatility of the model makes it much more likely to obtain a good fit between observed and computed output* ». Face au défi que représentait la détection de tendances lentes au sein d'un signal qui ne pouvait être directement mesuré, nous avons choisi et utilisé tout au long de cette thèse une approche de modélisation pluie-débit se fondant exclusivement sur les recommandations de Nash et Sutcliffe, en nous appuyant sur les travaux développés au Cemagref d'Antony au cours des vingt dernières années. Le modèle utilisé, GR4J, cherche à caractériser de la façon la plus efficace et parcimonieuse possible le comportement d'un bassin versant, sans chercher à identifier individuellement les processus physiques en jeu.

La communauté que nous avons choisie nous semble être la mieux appropriée pour faire sortir la science hydrologique de la stagnation de ces dernières années. Nous respectons cependant les convictions des autres hydrologues. Nul ne peut dire à l'heure actuelle qui fait fausse route. Et après tout, faire fausse route fait partie de l'activité du chercheur. Comme le dit Lévy-Leblond (2000) « *précisément parce qu'il cherche ce qu'il ne connaît pas, le chercheur ne peut que passer le plus clair de son temps à explorer de fausses pistes, à suivre des intuitions erronées, à se tromper : la plupart des calculs théoriques sont erronés, la plupart des manipulations expérimentales sont ratées – jusqu'au jour où...* »

Introduction

Les ressources en eau renouvelables sont-elles durables ?

Pour assurer leur pérennité, les sociétés humaines se doivent de garantir la durabilité de leur approvisionnement en eau. Aussi, la question de la stationnarité du régime hydrologique des bassins versants est-elle une préoccupation récurrente des gestionnaires de la ressource en eau, qui doivent prendre de lourdes décisions d'investissement dans un contexte rendu incertain par la variabilité (naturelle ou non) du climat.

Tant que le niveau d'utilisation de la ressource en eau renouvelable est resté bas, les Hommes se sont peu préoccupés de la variabilité de la ressource. Mais le niveau croissant d'utilisation effective de l'eau a considérablement augmenté au cours du 20^{ème} siècle, pour atteindre aujourd'hui un niveau qui n'est pas durable dans un grand nombre de régions du monde : si l'on se réfère à l'indice de consommation¹ des ressources en eau, l'état « actuel » (correspondant aux années 1980-90) présenté par Margat (1998) montre une situation préoccupante, avec certains pays du Sud de la Méditerranée, du Proche-Orient et d'Asie Centrale qui *consomment* déjà plus de 50 % de leur ressource moyenne annuelle renouvelable. Les projections réalisées à l'horizon 2025 par Andréassian et Margat (1997) montrent une situation qui pourrait continuer à s'aggraver (Figure 0.1), et menacer à la fois la sécurité alimentaire, le développement des pays du Sud et l'état des milieux aquatiques.

¹ La *consommation* couvre la part de l'eau prélevée dans le milieu naturel (cours d'eau et nappes) qui, une fois prélevée, ne rejoint plus le cycle continental de l'eau (c'est à dire évaporée ou rejetée en mer). Il est utile de distinguer *consommation* et *prélèvement*, dans la mesure où, suivant les secteurs d'utilisation, une plus ou moins grande partie de l'eau peut être recyclée au sein du bassin versant et réutilisée à l'aval.

Là où la consommation semble stabilisée (essentiellement dans les pays les plus développés), la demande croissante pour une eau de meilleure qualité fait que la pression ne descend guère. A l'aval des grandes villes, il est indispensable de pouvoir diluer les effluents afin de protéger les écosystèmes aquatiques.

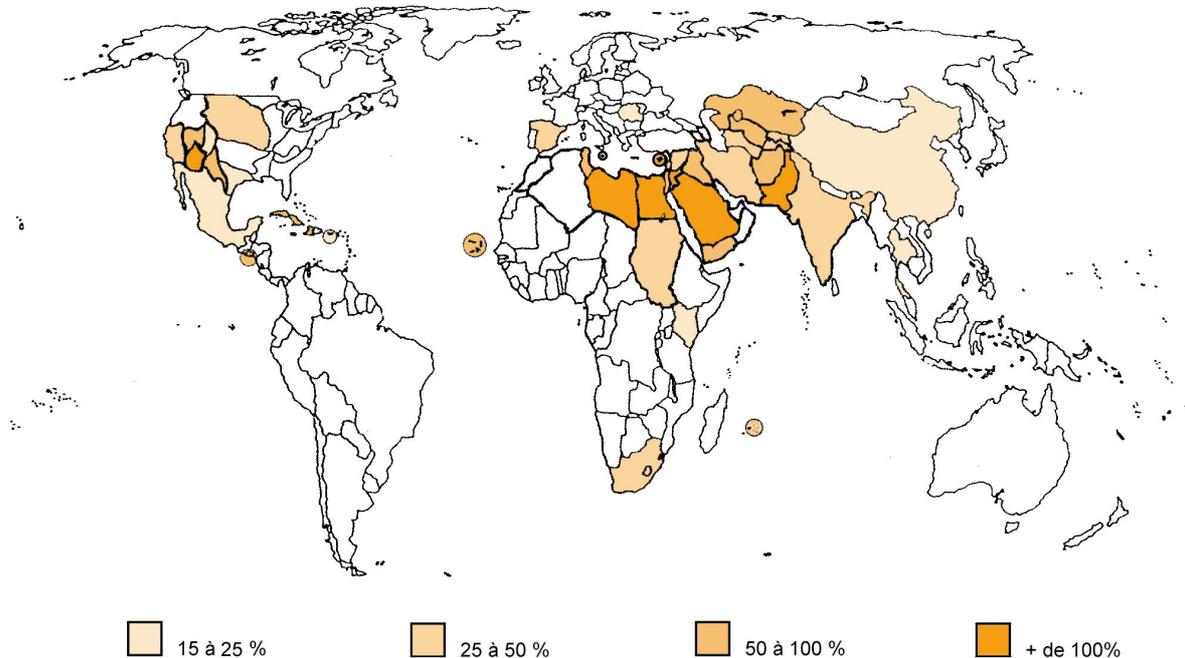


Figure 0.1 : Niveau potentiel d'utilisation (consommation) des ressources en eau en 2025 (d'après Andréassian and Margat, 1997)

Les changements qui menacent les ressources en eau

Changement climatique et évolution du comportement hydrologique des bassins versants

Là où les pressions sur les ressources en eau sont fortes, on suit avec anxiété les évolutions qui pourraient remettre en cause une situation déjà tendue. Si le thème du changement climatique lié au réchauffement global a été largement médiatisé au cours de la dernière décennie, il existe une autre source de non-stationnarité qui revient à l'attention du public de façon récurrente : il s'agit du changement de l'aptitude des bassins versants à transformer la pluie en écoulement (souterrain ou de surface) utilisable par l'homme.

Ces deux changements peuvent avoir les mêmes conséquences : ainsi, une réduction de l'écoulement moyen d'une rivière peut résulter d'une baisse de la pluviométrie ou d'un changement de l'occupation des sols du bassin. Il importe cependant de pouvoir distinguer les deux types de changement, car s'il est quasiment impossible d'intervenir directement sur le climat (et donc sur les régimes pluviométriques), il est en théorie possible de gérer le bassin versant (et notamment l'occupation des sols) pour tenir compte de son rôle de filtre transformant la pluie en débit.

D'un point de vue scientifique cependant, nous nous trouvons relativement désarmés, dans la mesure où la majeure partie des tests qui ont pu être développés (Perreault et al., 2000a; 2000b) s'applique à de longues séries de données mesurées. Malheureusement, le comportement hydrologique (la relation pluie-débit) d'un bassin versant n'étant pas une grandeur directement mesurable, la détection de ses changements (et *a fortiori* leur prévision) est une tâche excessivement complexe.

La forêt a-t-elle un rôle hydrologique?

Dans un contexte où se juxtaposent une crainte liée à un changement climatique global et une tendance persistante au reboisement des terres agricoles marginales, la question du rôle hydrologique de la forêt revient de façon naturelle sur le devant de la scène, à deux titres :

- D'une part, parce que ce sujet a animé pendant tout le 19^{ème} siècle un débat parfois violent entre forestiers et ingénieurs, ouvrant des plaies qui ne se sont pas encore refermées. Il y a donc un antécédent historique qui constitue un substrat d'autant plus propice à une controverse moderne sur la question, qu'il en subsiste des souvenirs dans l'inconscient collectif.
- D'autre part parce que les travaux des hydrologues forestiers américains, et les très nombreuses expériences qu'ils ont menées entre 1910 et 1970 sur de petits bassins versants, ont fait notablement avancer notre connaissance du fonctionnement des bassins versants et du rôle hydrologique du couvert forestier par rapport au 19^{ème} siècle.

En conséquence, nous nous sommes fixé comme objectif général pour cette thèse de préciser l'impact de la forêt (en tant que couverture végétale de tout ou partie d'un bassin versant) sur le comportement hydrologique d'un bassin versant.

Objectifs de cette thèse

Cette thèse a trois objectifs principaux :

1. comprendre l'origine du débat actuel sur le rôle hydrologique des forêts ;
2. évaluer la capacité des outils hydrologiques existants à détecter des changements du comportement des bassins versants ;
3. étudier le lien possible entre non stationnarité et évolution forestière dans une zone test : le Massif central ;

Les racines du débat sur le rôle hydrologique de la forêt

Pour comprendre le débat actuel, nous procédons tout d'abord à une revue de la littérature. C'est l'objet de la première partie de cette thèse : le Chapitre 1 couvre la période de l'Antiquité à la fin du 19^{ème} siècle, et le Chapitre 2 se concentre sur les acquis de la science « moderne », fondée sur les expérimentations des forestiers américains à partir du début du 20^{ème} siècle.

Les outils dont nous disposons permettent-ils de détecter des changements de comportement hydrologique ?

Nous étudions ensuite les possibilités offertes par les outils hydrologiques actuels pour détecter les changements du comportement des bassins versants. Après une discussion générale des possibilités offertes par les différentes classes de modèles hydrologiques au chapitre 4, nous apportons une contribution originale à l'étude de la sensibilité des modèles pluie-débit à leurs données d'entrée aux chapitres 5 et 6. Nous discutons ensuite au chapitre 9 des méthodes adaptées à la détection des tendances au sein du comportement hydrologique des bassins, et nous proposons deux nouveaux tests non-paramétriques, validés sur des cas d'écoles issus de la littérature hydrologique (chapitre 10).

L'évolution du couvert forestier permet-elle d'expliquer les non-stationnarités du comportement hydrologique des bassins versants du Massif central ?

Nous appliquons enfin les tests mis au point à un échantillon de bassins versants du Massif central, pour lequel nous avons établi (aux chapitres 7 et 8) des indicateurs de suivi du couvert forestier, en utilisant les relevés de l'Inventaire Forestier National. Nous essayons alors de relier variabilité du comportement hydrologique et variabilité forestière (chapitre 12).

Partie I - Eaux et Forêts : de la controverse historique au débat scientifique

L'objectif de cette première partie est de présenter l'évolution historique des idées, puis l'état des connaissances actuelles sur le rôle hydrologique de la forêt.

Pourquoi porter un tel intérêt à l'aspect historique du sujet ? Essentiellement pour mieux comprendre les raisons qui font que l'opinion publique française reste convaincue que les forêts ont une influence exclusivement bénéfique sur la conservation des eaux (réduction des crues, augmentation des étiages, alimentation des sources). Le débat scientifique, lui aussi, est encore largement imprégné des prises de position du 19^{ème} siècle, et pourrait bénéficier d'un examen approfondi de son contexte historique.

Dans le chapitre 1, nous présentons les origines de ce débat, qui remontent au moins à la fin du 18^{ème} siècle, et qui a opposé en France deux factions : nous avons choisi de les nommer « *parti des forestiers* » et « *parti des ingénieurs*. » Les thèses et les arguments de chacun des partis sont présentés, puis le débat est analysé dans son contexte politique et scientifique. Enfin, nous replaçons les vues exprimées par les médias actuels dans leur contexte historique.

Dans le chapitre 2, nous reprenons les travaux plus récents sur les petits bassins versants expérimentaux. Nous montrons comment l'invention de la méthode dite des « bassins versants appariés » a permis d'éclaircir considérablement le rôle hydrologique de la forêt, et nous présentons une synthèse des expériences publiées à ce jour.

1 HISTOIRE DES IDEES SUR LE LIEN ENTRE EAUX ET FORETS

1.1 Origine des croyances relatives à l'effet de la forêt sur le climat et le débit des rivières

Quand les Hommes ont-ils commencé à s'interroger sur les relations entre eaux et forêts ? Cette question pourrait prêter à sourire, tant la science hydrologique est récente à l'échelle de l'histoire humaine. Pourtant, il semblerait que le sujet ait suscité la curiosité des Anciens dès l'Antiquité.

Dans le *Critias*, écrit en 360 avant J.C., Platon évoque le passé légendaire de l'Attique; il ne fait que juxtaposer l'existence de forêts et l'abondance du débit des rivières, qu'il semble plutôt attribuer à la présence d'une profonde couverture pédologique :

« Mais dans l'état primitif du pays, ses montagnes étaient de hautes collines couvertes de sol, et les plaines de Phelleus, telles que nous les appelons, étaient couvertes de terre riche, et il y avait abondance de bois dans les montagnes [...]. De plus, la terre récoltait les bénéfices de la pluie annuelle, elle ne la perdait pas comme aujourd'hui en la laissant ruisseler sur le sol nu et rejoindre la mer. Il y avait de l'eau partout en abondance, la terre la recevait en son sein et la conservait dans le sol argileux, relâchant dans des creux les rivières qu'elle avait absorbée des hauteurs, fournissant partout d'abondantes fontaines et rivières [...] ».

Il faut attendre Pline l'Ancien, naturaliste romain du premier siècle de notre ère, pour trouver une allusion directe au rôle hydrologique des forêts. Dans son *Histoire Naturelle*, il observe : *« Souvent, après que l'on ait coupé des bois, naissent des sources que les arbres consommaient pour leur nourriture : par exemple, sur le mont Himus, lorsque Cassandre assiégeait les Gaulois qui coupèrent une forêt pour se faire un retranchement. Souvent, en abattant les bois qui couvraient une colline, et qui retenaient les nuages et s'en alimentaient, on a vu se former des torrents désastreux »* (XXXI, 30). Dans ce court paragraphe se mélangent déjà deux considérations : l'une concerne le rôle hydrologique de la forêt (les arbres qui consomment l'humidité du sol), l'autre concerne l'impact de la destruction de la couverture du sol et les problèmes d'érosion qui en découlent. Cette juxtaposition se poursuit encore aujourd'hui.

Dans un historique qu'il a publié en 1948, Joseph Kittredge¹, professeur de Sciences Forestières à l'Université de Californie, considérait la France comme pionnière pour la mise en évidence des relations entre l'eau et la forêt. Il faisait référence à la publication d'un décret royal sur « les Eaux et les Forêts » en 1215² par Louis VI, qui manifestait, pour l'auteur, *« the recognition, even in those days, of the close relation between water and forests »* (Kittredge, 1948). En 1823, Baudrillart écrivait déjà : *« ce*

¹ L'historique de Kittredge fait autorité en la matière. Il a été notamment repris dans le *Handbook of Applied Hydrology* dirigé par Ven Te Chow (1964).

² Pour Baudrillart (1823) la création des « maîtrises des Eaux et Forêts » date du règne de Philippe-le-Bel en référence à une ordonnance d'août 1291, définissant le rôle des maîtres des Eaux et Forêts. Dans l'Histoire de l'Administration Française, il semble que la notion d'Eaux et Forêts apparaît en 1219 dans une ordonnance de Philippe-Auguste. Quoiqu'il en soit, Kittredge se trompe sur le roi qui règne en 1215 : c'est Philippe-Auguste.

n'est pas sans motifs que l'administration des forêts et celle des eaux ont été réunies d'abord chez les Romains, et ensuite en France et dans presque tous les pays. Il y a, entre les unes et les autres, des rapports intimes et une dépendance réciproque. Les forêts alimentent les cours d'eau, et la présence des eaux favorise la végétation des arbres ; les unes et les autres ont une grande influence sur la température, la salubrité de l'air, la navigation, l'agriculture et le commerce. »

Nous ne discuterons pas ici ce point de vue même si, historiquement, il semble plus probable que cette association de mots ne constitue qu'une expression commode pour désigner... les chasses et les pêches du roi de France, ou encore une ressource financière importante pour la caisse royale, tant il est vrai que les revenus issus des forêts ou des pêcheries du roi représentent pour lui aux 13^{ème} et 14^{ème} siècles jusqu'à un quart de son budget (Collectif, 1987). Cette opinion semble confortée par Plaisance (1979) lorsqu'il évoque l'origine des forestiers : « *on sait qu'il y avait déjà au temps de Charlemagne des forestarii chargés surtout des réserves de chasse et de pêche.* »

Pour ce qui est de l'influence de la forêt sur la pluviosité, Kittredge remonte à Christophe Colomb, qui aurait attribué la différence de pluviométrie entre les Açores et les « Indes Orientales » au couvert forestier. Les Açores auraient été dans le passé couvertes de forêts, et leur destruction constituerait, pour l'explorateur, la cause de la baisse des pluies. Kittredge estime qu'il s'agit là de la plus ancienne expression de l'opinion - encore aujourd'hui largement répandue - que les forêts augmentent ou attirent les précipitations¹.

Kittredge relate également de nombreuses observations en provenance d'Italie, du Japon, de Hollande, du Danemark et d'Allemagne qui rapportent l'influence du déboisement sur l'érosion des sols en montagne et le transport solide. Mais à nouveau, c'est la France qui attire le plus son attention, pour les travaux de Brémontier (1793, an V), Surell (1841), Belgrand (1853, 1854), et Becquerel (1853, 1865).

Dans la section suivante, nous nous sommes attachés à présenter les arguments d'auteurs des 18^{ème} et 19^{ème} siècles, en nous attachant à mettre en lumière les croyances cachées derrière leurs analyses et leurs interprétations.

1.2 Evolution des idées aux 18^{ème} et 19^{ème} siècle

Nous commençons ici par présenter les arguments de ce que nous avons choisi d'appeler le *parti des forestiers*, puis la vision du *parti des ingénieurs*. Cette séparation en deux camps est un peu manichéenne, mais elle a l'avantage de clarifier le débat qui a eu lieu tout au long du 19^{ème} siècle, et qui a opposé les partisans d'une forêt qui régulerait les débits, augmenterait les pluies, interdirait les crues et alimenterait les

¹ Les hydrologues modernes considèrent qu'il s'agit plutôt d'une confusion entre cause et effet : *la forêt est présente parce qu'il pleut suffisamment*, plutôt que *il pleut parce que la forêt est présente*. Cependant, il est possible, dans certains cas très particuliers, d'observer des phénomènes de condensation des brouillards sur les arbres (« fog-drip »).

sources, à des ingénieurs¹ qui ont cherché à aborder le problème d'un point de vue scientifique, et à tester par des observations les différentes théories existantes sur le rôle de la forêt sur le cycle de l'eau.

1.2.1 Le Parti des Forestiers

Nous présentons ici, par ordre chronologique, les thèses et les arguments des principaux auteurs qui ont cherché à montrer le rôle positif de la forêt sur le climat et le débit des rivières.

■ Bernardin de Saint Pierre (1787)

Bernardin de Saint-Pierre (1737-1814) a été rendu célèbre par *Paul et Virginie*, ouvrage qui n'est pourtant à l'origine qu'un supplément détachable² de ses *Etudes de la nature*. Publiées entre 1784 et 1788, les *Etudes* sont empreintes du même style romantique que *Paul et Virginie*. On trouve dans le livre 2 de savoureux passages sur l'impact de la forêt sur la pluie et le débit des rivières. Ainsi, au sujet des montagnes de l'île de France, l'auteur écrit (p. 420) :

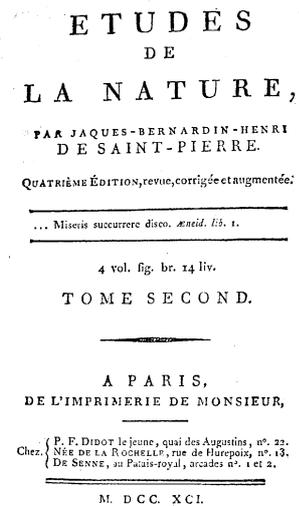
« Cette attraction végétale des forêts de cette île est si bien d'accord avec l'attraction métallique des pitons de ses montagnes, qu'un champ situé en lieu découvert, dans leur voisinage, manque souvent de pluie, tandis qu'il pleut presque toute l'année dans les bois qui n'en sont pas à une portée de fusil. C'est pour avoir détruit une partie des arbres qui couronnoient les hauteurs de cette île, qu'on a fait tarir la plupart des ruisseaux qui l'arrosaient : il n'en reste plus aujourd'hui que le canal desséché. Je rapporte à la même imprudence la diminution sensible des rivières et fleuves dans une grande partie de l'Europe, comme on le peut voir à leur ancien lit qui est beaucoup plus large et profond que le volume d'eau qu'ils contiennent aujourd'hui. »

Bernardin de Saint Pierre pense donc que « si on plantoit en France des arbres de montagne sur les hauteurs et à la source de nos rivières, on leur rendroit leur ancien volume d'eau, et on feroit reparoître dans nos campagnes beaucoup de ruisseaux qui n'y coulent plus du tout. »

■ Rougier de la Bergerie (1800, an IX)

Rougier de la Bergerie a l'occasion de visiter un grand nombre de départements dans la France post-révolutionnaire. Il recueille de nombreux témoignages oraux et écrits, et dresse une liste des dégâts occasionnés par les déboisements abusifs suite à l'adjudication des biens nationaux.

Dans son *Mémoire sur les abus de défrichements et la destruction des bois et forêts* (1800), il dresse une longue liste de forêts



M É M O I R E
ET OBSERVATIONS
SUR LES ABUS DES DÉFRICHEMENTS
ET LA DESTRUCTION DES BOIS ET FORÊTS;
AVEC UN PROJET D'ORGANISATION FORESTIÈRE.
Par le Cit. ROUGIER-LABERGÈRE, de l'Institut national. Membre
de l'École de Yonne, des Sociétés d'Agriculture de Paris, de
Yonne, de la Marne et du Doubs.



A AUXERRE;
DE L'IMPRIMERIE DE LAURENT FOURNIER,
IMPRIMEUR DU LYCÉE DE YONNE.
AN IX.

¹ Essentiellement des ingénieurs du corps des Ponts et Chaussées, il n'y a pas à l'époque d'ingénieurs des eaux et forêts

² Le succès de *Paul et Virginie* est tel qu'il lui donnera par la suite un statut autonome.

ruinées et de pentes dénudées par le décapage de la terre végétale des versants. Il rapporte également des cas d'inondations catastrophiques et de gelées qui ont anéanti des récoltes.

Au sujet du département de l'Yonne, il écrit : « à chaque orage, les pluies, dans tous ces pays montueux, descendent en torrents, entraînent la terre végétale ; la surface productible de milliers d'arpents, roule avec les flots des rivières et disparaît pour toujours ; les villages, que nos ancêtres avaient placés dans les vallées, sont renversés et entraînés par les eaux ; les fontaines disparaissent ou diminuent sensiblement ; les ruisseaux sont à sec, les trois quarts de l'année ; pendant les chaleurs de l'été, le peuple se presse autour d'un filet d'eau de source, dernier présent que la nature peut offrir encore, dans les endroits où on a épargné les bois. Nous avons des exemples récents et frappants de ces effets par les ravages de Gy, Vallan et Jussy, et par la disparition des eaux, où jadis elles étaient si abondantes, à Coulanges, Courson, Méry, etc. »

Pour Rougier de la Bergerie, la situation est alarmante : « Les eaux disparaissent [...] ; et il est inutile de rien ajouter à ce fait trop incontestable, d'après la sécheresse extrême qui vient de signaler l'an VIII, pendant laquelle, dans tous les départements, on a éprouvé plusieurs fois le tarissement des sources dans les puits et fontaines, et dans des lieux où jadis, on avait été occupé au contraire à se préserver de leur trop grande abondance. » Pour preuve de ce qu'il avance, il recommande de procéder à une comparaison de l'état actuel de boisement de la France avec celui figurant sur la carte de Cassini. Alors écrit-il « vous concevrez un juste effroi sur les suites terribles de la dégradation du sol, et de la destruction des forêts. »

L'appel qu'il lance aux « peuples, magistrats, savants et consuls de la France », résume bien son analyse du rôle hydrologique de la forêt :

« Quand manquant d'objets de première nécessité, vos magistrats et les commerçants attendent avec anxiété une crue [de la Seine] pour la rendre navigable, rappelez-vous du moins alors, que quelque grande cause a fait diminuer les sources, tarir ou suspendre le cours des eaux. Quand [...] occupés de fêtes et de plaisirs, vous voyez tout à coup les eaux de la Seine franchir ses bords, inonder vos places, porter sur ses flots les débris des moissons, des meubles ou des victimes humaines, songez du moins alors, que ces inondations subites, qui causent tant de malheurs et de désastres, proviennent de la nudité des monts, de la disparition des arbres et des plantes qui en auraient suspendu le cours. »

L'ouvrage de Rougier de la Bergerie est suivi d'un « Projet d'Organisation Forestière » où il est fait allusion à l'eau et aux bassins versants¹.

Les arguments de Rougier de la Bergerie sont fondés pour l'essentiel sur des observations faites au cours de déplacements en France. Ils sont donc dignes d'attention. Cependant, il faut souligner l'influence déterminante d'événements climatiques extrêmes des années 1790-1800 (sécheresse dans l'Yonne, gel des oliviers en Provence) sur son analyse, ainsi que le fait qu'il mélange dans son raisonnement les dégâts - incontestables - occasionnés aux sols par la mise en culture de versants abrupts, avec l'impact - discutable - de la forêt sur la pluviosité et l'écoulement des rivières.

¹ Ainsi, l'article IX recommande d' « établir une diminution graduée de l'impôt foncier, pour tous les bois taillis des montagnes, dont les eaux coulent à la Méditerranée. » Il s'agit à notre connaissance de la première tentative d'intégrer une condition hydrologique explicite dans un règlement forestier.

▪ Rauch (1801 (an X)-a,b; 1818a,b; 1821; 1824)

Le ton du premier livre de Rauch (*Harmonie hydrovégétale*) aurait nécessité la création d'une classe particulière, celle des *romantiques*. Dans la dédicace de son ouvrage au premier Consul, il écrit : « *nos belles montagnes sont dépouillées du brillant vêtement de ces forêts majestueuses qui les couvraient de leurs ombres protectrices et silencieuses ; les météores, déchaînés, ne s'annoncent plus que par des ravages et de sinistres sifflements [...] les ruisseaux ne s'écoulent plus qu'avec langueur ; [...] les urnes de nos vieux fleuves ne versent plus leurs belles eaux que par intermittence, et nos canaux nautiques, menacés de s'éteindre, sont forcés de ravir les eaux nécessaires à nos cultures ; [...] l'inclémence croissante des températures et des saisons, arrête partout la volonté libérale de la nature.* » Parlant de la *Régénération des sources et des fontaines*, il s'exclame : « *Que de plaisirs, que de jouissances, que de biens perdus par la perte d'une seule fontaine !... Régénérons donc celles qui existent encore, de nouvelles vont se créer à leurs côtés ; donnons-leur pour protecteur le puissant platane, le cèdre des eaux et des vallées ; qu'à l'ombre de son large palais de verdure, les urnes de nos fontaines se remplissent de nouveau ; il saura de sa cime majestueuse et élevée, appeler les nuages, pour les rendre à leur primitive abondance.* »

Car pour Rauch, la forêt a une influence majeure sur le climat : il cite les travaux d'un obscur physicien du nom de Hallès qui aurait démontré que les plantes captent l'humidité atmosphérique et la distillent au sol. Il déclare que l'« *on sait, à ne plus pouvoir en douter, que les bruissantes forêts qui forment le plus bel ornement de la nature, exercent le plus puissant empire sur tous les météores aqueux, avec lesquels elles paraissent avoir des affinités si intimes, qu'il semble qu'à leur existence tiennent toutes les consonances qui lient le règne végétal au règne animal.* » Et le climat pourrait même être modifié (adouci) par la forêt, jusqu'au point de changer la végétation : « *Alors la nature, réunissant de nouveau tous les éléments de sa force, offrira de nouvelles merveilles à notre admiration : on verra les végétaux du midi de la France monter graduellement dans les départements tempérés, et ceux-ci s'aller associer aux végétaux des départements du nord.* »

Rauch appartient donc bien au parti des forestiers, et il brille essentiellement par le peu de sérieux de son argumentation. Certaines contradictions dans son propos sont parfois flagrantes : ainsi, les arbres auraient simultanément la capacité de préserver les cours d'eau de l'évaporation par leur ombrage (Chapitre XII), et d'évaporer l'excès d'eau des marais (Chapitre XIV)¹.

A la Restauration, Rauch apparaît comme l'un des grands animateurs des débats sur le rôle hydrologique des forêts, débat qui aura pour support, à partir de 1821, une revue qu'il édite : les *Annales Européennes de Physique Végétale et d'Economie Publique*².

¹En réalité, il existe deux contradictions similaires dans le discours des forestiers : la forêt réduit l'évaporation, mais elle assainit les marais ; la forêt fait pleuvoir plus, mais elle réduit les crues. Le seul qui semble avoir reconnu cette contradiction est Claudius Bernard (1927) qui écrit : « *comme la présence d'une forêt sur un sol est susceptible d'accroître le volume des précipitations, on conçoit que, dans certains cas exceptionnels, le reboisement puisse avoir pour effet d'accroître la hauteur des précipitations exceptionnellement abondantes et exceptionnellement prolongées.* »

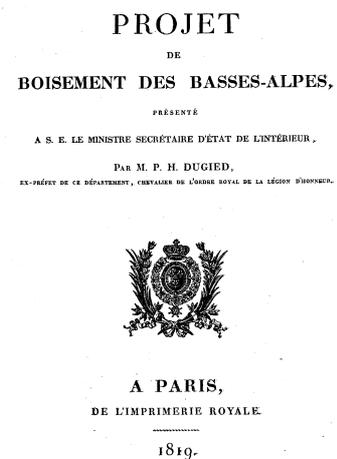
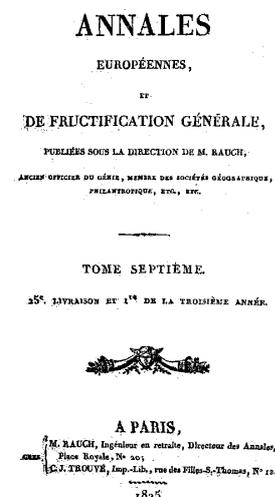
² Cette revue, qui portera un peu plus tard le nom d'*Annales Européennes et de Fructification Générale*, paraîtra entre 1821 et 1825 (7 tomes au total). Rauch utilise cette tribune pour mener - à sa manière - une véritable croisade pour le reboisement afin d'améliorer le régime des eaux.

Son style reste toujours aussi élégant et poétique, toujours aussi dénué d'argumentation scientifique. Il assène ainsi en p. 9 du Tome I: « *Nous avons démontré [...] que des déboisements successifs (qui égalent déjà en Europe la moitié de sa surface), est résulté un dérèglement sensible dans le cours des météores, dans les températures et les saisons et, par suite naturelle, une diminution dans les productions de la terre et des eaux.* » On comprend encore mieux que sa vision se fonde sur la recherche d'un état originel idyllique, avec la citation suivante : « *Lorsque notre planète sortit du souffle du créateur, tout ce qui fut nécessaire, beau, parfait, indispensable était accompli. La loi éternelle des attractions réciproques eut avec l'action du soleil, pour agents principaux, les mers, les montagnes, les météores et les forêts, dont les corrélations intimes et continues devaient entretenir l'harmonie des éléments, pour la conservation de toute la nature.* » Dans ce paradis terrestre idéalisé, le rôle de l'arbre est simple : « *les arbres peuvent être considérés comme des siphons intermédiaires entre les nuages et la terre ; de leurs cimes attractives, ils commandent au loin aux eaux voyageuses de l'atmosphère de venir verser, dans leurs urnes protectrices, les eaux qui doivent nourrir les sources, faire couler les ruisseaux [...]. Notre hémisphère et les montagnes surtout, ne possédant plus la moitié des forêts qui les couronnaient, et le soleil élevant invariablement la même quantité d'eau dans les airs [...] on doit songer avec effroi ce que peuvent, ce que doivent devenir ces mers suspendues, lorsque les végétaux diminués ne peuvent plus en pomper la moitié.* » Enfin, Rauch est convaincu que l'eau qui n'est pas attirée par les arbres va se fixer aux pôles, étendant ainsi le domaine des glaces...

▪ Dugied (1819)

Dugied a été préfet des Basses Alpes et son « *Projet de boisement des Basses-Alpes* » est un réquisitoire pour la lutte contre l'érosion torrentielle. Il est parfois considéré comme l'un des prédécesseurs de Surell (1841) dans le domaine de la Restauration des Terrains en Montagne (RTM), mais nous l'avons classé parmi les forestiers car il propage - à côté de propositions plus réfléchies - les idées classiques sur le rôle climatique des forêts :

« *En effet, il est reconnu que les hautes montagnes exercent une attraction sur les nuages, et que cette attraction est la plus grande possible, lorsque les sommets sont boisés ; alors les nuages sont non-seulement attirés, mais retenus : forcés de se résoudre en rosée, ils entretiennent le pied des forêts dans une humidité permanente. Pénétrant jusqu'aux réservoirs préparés par la nature, cette humidité alimente les sources et tient les eaux à un niveau presque constant : que si l'imprudance des hommes vient à détruire les forêts, la face des lieux change aussitôt.* »



▪ Lamarck (1820)

Le célèbre biologiste Lamarck vient soutenir les idées des forestiers dans son *Système analytique des connaissances positives de l'homme* (1820). Il y écrit : « L'homme, [...] par son insouciance pour l'avenir et pour ses semblables, semble travailler à l'anéantissement de ses moyens de conservation et à la destruction même de sa propre espèce. En détruisant partout les grands végétaux qui protégeaient le sol, pour des objets qui satisfont son avidité du moment, il amène rapidement à la stérilité ce sol qu'il habite, donne lieu au tarissement des sources [...] ».

▪ Baudrillart (1823)

Baudrillart commence sa carrière dans l'administration forestière en tant que traducteur d'allemand. Il y poursuivra sa carrière jusqu'à devenir chef de bureau. Il est l'auteur d'un *Traité général des Eaux et Forêts* en quatre volets, comprenant un *Dictionnaire des Eaux et Forêts* en deux volumes, qui synthétise la connaissance forestière de l'époque. Concernant le rôle des forêts sur l'hydrologie et le climat, on y trouve les vues suivantes :

« [Les forêts] concourent à l'harmonie des lois de la nature ; elles exercent sur l'atmosphère la plus heureuse influence ; elles attirent et divisent les orages, les distribuent en pluies bienfaisantes ; elles alimentent les sources et les rivières ; [...] elles soutiennent et affermissent le sol sur la pente rapide des coteaux. [...] Si nous opposons à ce tableau celui des contrées qui n'ont pas su respecter leurs antiques forêts, nous voyons ces régions livrées à toute l'action des vents ; elles n'éprouvent plus les alternatives heureuses de fraîcheur et de chaleur ; elles sont dévorées par de longues sécheresses, ou inondées par des pluies qui se prolongent d'une manière désastreuse ; les cours d'eau qui ont cessé d'être entretenus par des sources permanentes, se tarissent ou débordent en torrents ; le lit des rivières s'encombre ; le soleil dissipe promptement l'humidité de la terre et lui enlève le principe de sa fécondité ; l'œil ne rencontre partout que le spectacle de la stérilité et de la misère. »

« Tous les physiciens attribuent aux défrichements la cause de la diminution des eaux et de l'élévation de la température [...] »

Influence de la forêt sur la pluviosité :

« La quantité d'eau qui tombait autrefois en France était beaucoup plus considérable qu'elle ne l'est en ce moment, ainsi que le prouvent la largeur de l'ancien lit des rivières et les documents historiques. Cette diminution est due, 1°. A l'abaissement des montagnes, 2°. A la destruction des bois qui en couvraient les sommets. C'est donc un devoir du gouvernement non-seulement de s'opposer aux défrichements nouveaux sur le sommet des montagnes, mais encore d'employer des moyens coercitifs pour obliger les propriétaires à les replanter en bois. »

Mode d'action supposé des bois pour augmenter la pluviosité :

« Lorsque les Alpes et autres grandes chaînes étaient plus élevées qu'elles ne le sont aujourd'hui, les pluies dominantes devaient également être plus abondantes. [...] Les bois augmentent l'élévation des montagnes de toute la hauteur des arbres qui les recouvrent, et comme ils ont d'ailleurs la propriété d'attirer des nuages par le mouvement de leurs feuilles et d'aspirer une grande quantité d'eau, on doit, pour l'avantage de l'agriculture, les conserver religieusement sur ces sommets. La destruction des bois dans ces situations est la cause de la diminution des eaux et même de la disparition des rivières et des fontaines dans un grand nombre de contrées. »

Baudrillart reprend l'idée de Rougier de la Bergerie (1800, an IX) et propose à son tour d'utiliser la cartographie de Cassini pour évaluer les changements d'occupation des sols : « Cassini a figuré sur sa carte tous les bois et boqueteaux, tous les étangs, viviers et fontaines ; il n'a pas même négligé des arbres isolés [...]. Qu'on prenne à la main des plans linéaires, des états de sections pour l'impôt foncier, sur lesquels seulement on aura figuré les bois et les eaux encore existants, qu'on les compare à ceux qui se trouvaient alors sur le sol de la France, et ce calque fatal inspirera sûrement à tout vrai Français un salutaire effroi. » Car « au temps de Cassini, il y avait environ quatre mille rivières, non compris les petits cours d'eau. Mais un travail ordonné par le Comité de Salut Public, relatif à un système général de navigation, a établi qu'il y avait déjà, sur le sol, une immense diminution dans le volume des eaux courantes et réservées, et les auteurs, sans hésiter, en attribuèrent la principale cause à la destruction des bois et boqueteaux. »

Enfin, reprenant le contenu des livres de Rauch (1801, an X) et de Rougier de la Bergerie (1800, an IX), Baudrillart conclut :

« Il résulte de tous ces documents, que la destruction des forêts, notamment sur les montagnes, est considérée comme ayant eu pour résultat le changement de la température, la diminution des eaux, le tarissement de plusieurs ruisseaux et rivières, l'irrégularité des pluies, la fréquence des ouragans, la gelée des oliviers et des vignes, privés de leurs abris, et la rareté des bois de toute espèce. »

Comme le note Badré (1983), le livre de Baudrillart est resté jusqu'à aujourd'hui un ouvrage de référence pour les forestiers. Ses arguments ont donc trouvé une large audience parmi les forestiers.

▪ Boussingault (1837)

Boussingault¹ ramène de son séjour en Amérique du Sud des observations du nouveau monde, qui impressionnent beaucoup les forestiers. Pour l'analyse qu'il fait, il se fonde sur les variations de niveau des lacs d'Amérique du Sud, qui constituent en quelque sorte un moyen de jaugeage de la production d'eau des bassins versants. Liant les variations de niveau des lacs aux défrichements, et utilisant des observations sur la puissance fournie par une rivière près de la mine qu'il a dirigée, il conclut :

« 1° Que les grands défrichements diminuent la quantité des eaux vives qui coulent à la surface d'un pays ;

2° Qu'il est impossible de dire si cette diminution est due à une moindre quantité annuelle de pluie, à une plus grande évaporation des eaux pluviales, ou à ces deux effets combinés ; [...]

4° Qu'indépendamment de la conservation des eaux vives, les forêts ménagent et régularisent leur écoulement ; [...]

6° Que par des déboisements purement locaux, des sources peuvent disparaître, sans qu'on soit en droit de conclure que la quantité de pluie annuelle ait diminué ;

¹ Jean-Baptiste Boussingault (1802-1887), est un chimiste agricole du 19^{ème} siècle, célèbre pour avoir démontré que les plantes n'absorbent pas l'azote atmosphérique mais les nitrates du sol, et qu'elles dérivent leur matière organique du dioxyde de carbone atmosphérique. Il a d'abord dirigé des mines en Amérique du Sud, avant de revenir en France et de devenir professeur de chimie agricole au Conservatoire National des Arts et Métiers (1839-1887). Son opinion sur le rôle hydrologique des forêts se fonde sur ses observations faites en Amérique du Sud.

7° *Qu'en se fondant sur des faits météorologiques recueillis dans les régions équinoxiales, on doit présumer que les grands défrichements diminuent la quantité annuelle de pluies qui tombe sur une contrée. »*

Boussingault est l'un de ces splendides scientifiques du 19^{ème} siècle, dont l'intérêt se portait sur une multitude de sujets et qui, à la manière d'Alexander von Humboldt ont ramené de leurs voyages à l'étranger une grande quantité de données qu'ils interprètent du mieux qu'ils le peuvent. Ces données ont toujours le même biais : elles ont été acquises sur de courtes périodes, ce qui ne permet pas de juger de la variabilité climatique naturelle. Enfin, la science hydrologique, qui se fonde nécessairement sur une grande quantité de mesures de pluie et de débit, est encore bien embryonnaire.

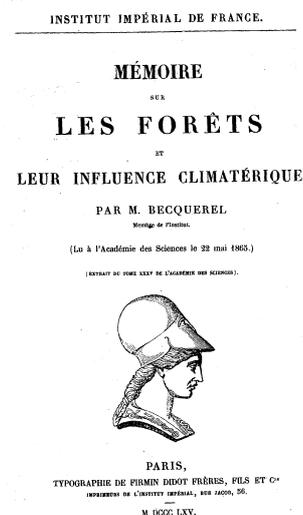
▪ Dausse (1842)

Comme Bernardin de Saint Pierre et Rauch, Dausse a été formé à l'Ecole des Ponts et Chaussées et, lorsqu'en 1842 paraît son article intitulé « *De la pluie et de l'influence des forêts sur les cours d'eau* », il est déjà ingénieur en chef. Mais son raisonnement scientifique sur les forêts est inexistant, il s'exprime plutôt sur la base d'une intime conviction : « *Sait-on que l'homme a le pouvoir de changer en quelques années, par le déboisement, un climat humide en un climat sec, et de dénaturer ou même de tarir les rivières et les sources ?* » L'explication est pour lui très claire : « *le feuillage de ces forêts, mettant la pluie à l'abri du soleil, la conserverait en été [...]. Le produit de chaque pluie prendrait ainsi plus de temps pour arriver à la rivière, et la crue serait plus durable et moins prononcée, quoique plus abondante [...]. L'eau du ciel ne serait pas comme aujourd'hui, surtout en été, reprise à la terre presque aussitôt que donnée.* » Pour Dausse, la forêt est clairement le moyen idéal de gestion de la ressource en eau, et le boisement est une mesure qui « *épargnerait, certainement, pour quelques-uns, des rigoles et réservoirs très coûteux; elle fournirait pour d'autres la seule alimentation qui puisse suffire aux exigences de la navigation.* »

Si nous avons pris la peine de le citer, c'est pour rappeler qu'il y a même des ingénieurs de rang élevé au sein du corps des Ponts et Chaussées qui se sont ralliés au parti des forestiers. Le corps des Ponts et Chaussées participe activement au débat, ce qui poussera de jeunes ingénieurs tels que Belgrand à recueillir des données hydrologiques pour tester les affirmations de leurs aînés.

▪ Becquerel (1853, 1865)

Les deux ouvrages de Becquerel, parus en 1853 et en 1865, ont sans aucun doute eu un impact considérable, tant par le sérieux d'une partie de l'argumentation, que par la personnalité de leur auteur, membre de l'Académie des Sciences,



professeur au Muséum d'Histoire Naturelle¹. Il est donc particulièrement intéressant de les analyser.

La première partie de son ouvrage intitulé « *Des climats et de l'influence qu'exercent les sols boisés et non boisés* » (1853) présente les climats du globe. La deuxième partie passe en revue les climats anciens (de l'orient) et présents (dans le monde), se fondant sur les récits des historiens grecs et romains et les descriptions des voyageurs modernes.

Rétrospectivement, on ne peut s'empêcher de sourire en lisant des raisonnements scientifiques s'appuyant sur des récits parfois à mi-chemin entre histoire et mythologie : « *Les montagnes de Chios, jadis couvertes de forêts, sont aujourd'hui entièrement dénudées. [...] Dodone a perdu sa forêt et son oracle. [...] On n'a pu retrouver dans la Troade le fleuve Scamandre, qui était encore navigable du temps de Pline ; son lit est aujourd'hui entièrement desséché ; mais les cèdres qui couvraient le mont Ida, où il prenait sa source [...] n'existent plus.* »

Etant convaincu par les preuves historiques qu'« *il ne reste plus aucun doute à l'égard de l'influence exercée par les bois sur la conservation des eaux vives dans une contrée* », Becquerel est donc persuadé que « *les grands défrichements diminuent la quantité des eaux vives qui circulent dans un pays* » et que « *les forêts, tout en conservant les eaux vives, ménagent et régularisent leur écoulement.* »

Lorsqu'il aborde l'influence du boisement et du déboisement sur le climat, l'auteur est beaucoup plus prudent et mesuré, disant que l'on ne peut se fonder que sur des mesures, sur des « *observations suivies faites avec le baromètre, le thermomètre, l'hygromètre, l'anémomètre, l'udomètre.* » Et il reconnaît que « *les bonnes méthodes d'observation étant récentes, on n'a donc pu réunir encore qu'un nombre trop peu considérable d'observations exactes pour statuer avec précision sur les changements que les climats auraient éprouvés avec le temps.* »

Dans l'ouvrage publié en 1865, Becquerel s'attache à mieux poser les problèmes, en faisant la liste des « *questions à résoudre avant de se prononcer sur le mode d'influence que peut exercer le déboisement d'une contrée sur son climat.* » Ces questions sont :

« 1° *Quel est le rôle que jouent les forêts comme abris contre le vent ou pour retarder l'évaporation des eaux pluviales ?*

2° *Quelle est l'influence des arbres sur l'eau aspirée par les racines et sur celle qui est exsudée par les feuilles pour modifier l'état hygrométrique de l'air ambiant ?*

3° *Comment modifient-elles l'état calorifique d'une contrée ?*

4° *Les forêts exercent-elles une influence sur les quantités d'eau tombées et sur la répartition des pluies dans le cours de l'année, ainsi que sur le régime des eaux vives et des eaux de source ?*

5° *Comment interviennent-elles pour la conservation des montagnes et des pentes ?*

6° *Les forêts servent-elles à enlever aux nuages orageux leur électricité et à en atténuer ainsi les effets sur les pays voisins non boisés ?*

7° *Quelle est la nature de l'influence qu'elles peuvent exercer sur la santé publique ? »*

¹ Antoine César Becquerel ne doit pas être confondu avec Henri Becquerel, son petit fils, prix Nobel de Physique en 1903.

Parmi les facteurs locaux à prendre en compte avant de pouvoir statuer sur l'action des forêts, Becquerel cite :

« 1° leur étendue, leur élévation, la nature du sol et celle du sous-sol ;

2° leur orientation, par rapport aux vents chauds ou froids, secs ou humides ;

3° l'âge auquel on les coupe, leur espèce, c'est à dire s'ils sont à feuilles caduques ou à feuilles persistantes, attendu que les pouvoirs rayonnant et émissif ne sont pas les mêmes dans toutes les saisons ;

4° la saison des pluies, si elles sont à pluies d'été, d'automne ou d'hiver ;

5° la proximité des marais pestilentiels, etc., etc. »

Si les propos qu'il tient font indubitablement de Becquerel un membre du parti des forestiers, et si son recours massif à l'histoire et à la mythologie grecque est critiquable, il faut cependant reconnaître qu'il a contribué à identifier les questions pertinentes pour éclairer un débat resté trop longtemps passionnel.

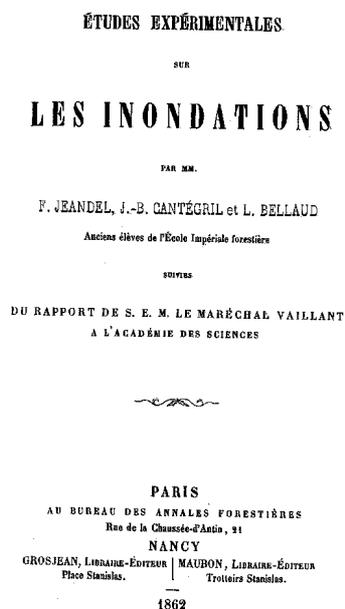
▪ Jeandel, Cantégril et Bellaud (1862)

Les mesures expérimentales entreprises par trois anciens élèves de l'école Forestière de Nancy consistent en un suivi hydrométrique et pluviométrique de deux bassins versants, l'un entièrement boisé, l'autre seulement à moitié. Cette étude vient en réponse aux mesures de Belgrand (1853). Nous abordons dans le détail ces deux expériences en Annexe I.1. Ce qui semble très important, c'est l'irruption d'une démarche réellement scientifique, fondée sur des observations hydrologiques directes, dans l'argumentaire des forestiers, qui s'étaient trop souvent contentés des historiens de l'antiquité. Ces travaux sont présentés à l'Académie des Sciences, qui demande au Maréchal Vaillant (ministre de la maison de l'Empereur, personnage politique de tout premier plan) un rapport sur cette étude. Ce dernier ne peut que constater que, malgré la rigueur de la démarche scientifique, la faible longueur de la chronique de mesure et la disproportion entre les surfaces de bassins comparés font que « *les conclusions du Mémoire [...] n'apparaissent pas suffisamment justifiées.* » (le mémoire concluait à une « action inondante » plus importante du bassin déboisé).

Quoiqu'il en soit, même si la science hydrologique est encore trop peu développée pour permettre une bonne exploitation des mesures effectuées, ces trois forestiers ont montré la voie à suivre pour aborder scientifiquement le problème de l'influence de la forêt sur l'hydrologie.

▪ Matthieu (1878)

Les mesures météorologiques conduites pendant onze années (1867-1877) par Auguste Matthieu, sous-directeur de l'Ecole forestière de Nancy ont, elles aussi, leur origine dans le débat « animé » par le Maréchal Vaillant au début des années 1860.



Elles sont très intéressantes, en raison de leur rigueur et de la large diffusion qui en sera faite.

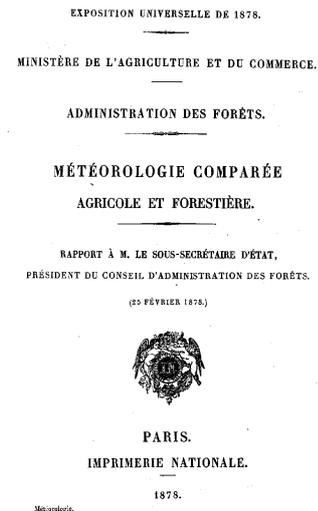
L'École Forestière de Nancy a mis en place un suivi pluviométrique, thermométrique et évaporimétrique en trois stations distinctes : une station est située au centre de la forêt de Haye, une seconde est située en lisière, la troisième se situe à une vingtaine de kilomètres en terrain agricole. Les résultats des observations sont les suivants :

pluviométrie : les observations montrent que la station située dans la zone agricole ne reçoit que 80% des précipitations des deux stations forestières. Cette différence est sans doute l'effet du hasard, mais pour tous les forestiers, c'est la preuve irréfutable que la forêt attire la pluie. Cependant, Auguste Matthieu souligne : « Cette série d'observations est malheureusement isolée, et l'on ne peut nier que la déduction tirée des résultats obtenus aux environs de Nancy a besoin, pour devenir une loi inattaquable, d'être fortifiée par beaucoup d'autres observations du même genre, poursuivie en des lieux divers et dans des forêts de toutes essences. Il reste là un vaste champ, fertile en conséquences, à explorer. »

Malheureusement, de pareilles expériences ne seront pas généralisées.

- *interception* : les études d'interception ont été menées en deux localités. Dans la première, l'École Forestière a installé un pluviomètre géant, couvrant l'ensemble de la surface située sous la cime d'un hêtre, interceptant notamment un tronc et l'écoulement qui s'y propage. Pour la deuxième localité, c'est un pluviomètre classique (diamètre : 50 cm) qui est utilisé. Mathieu mesure 8% d'interception moyenne sur 11 ans en un site, 16% sur l'autre. Il en conclut que, même après soustraction de l'interception, la lame d'eau tombée sous forêt est égale ou supérieure à la lame d'eau tombée en zone agricole.
- *évaporation* : ces études ont été entreprises parce que, pour Matthieu, « rien n'autorise la conclusion souvent formulée que le pouvoir [évaporatoire] des forêts dépasse notablement celui des cultures agricoles. » Malheureusement, les résultats qu'il obtient sont impossibles à interpréter parce qu'il place les bacs d'évaporation de la forêt sous l'ombre des arbres, alors que ceux situés hors forêt sont en plein soleil.
- *températures* : dans l'étude des températures, Matthieu « avait pensé, à l'origine, qu'avec une température moyenne mensuelle moins élevée en été les forêts présentaient en hiver une température supérieure à celle des champs ; que le déficit d'été était compensé par l'excédant d'hiver, et que, tout compte fait, elles n'exerçaient aucune influence sur la température moyenne de l'année. » Mais les mesures montrent que la température sous bois est en moyenne inférieure d'un demi-degré à la température hors bois. Au vu des moyennes des maxima et des minima, Mathieu conclut cependant que « la forêt a pour effet de régulariser la température des jours, des mois, des saisons [...] de rapprocher les climats forestiers des climats constants ou littoraux. »

Les expériences entreprises par l'École Forestière de Nancy sont les premières expériences réellement scientifiques destinées à éclaircir le débat sur l'influence climatique des forêts. Il faut bien entendu écarter les mesures évaporimétriques qui



sont ininterprétables, et ne peuvent donc pas, comme le voudraient les forestiers, éclairer le débat sur l'influence de la forêt sur le débit des sources. Les mesures de température mènent les forestiers à abandonner l'idée selon laquelle la forêt réchaufferait le climat, et les expériences pluviométriques permettent, pour la première fois, grâce au pluviomètre géant construit à cet effet, de quantifier l'interception. Malheureusement, le hasard de la localisation des pluviomètres ayant voulu que la pluie mesurée en zone agricole soit substantiellement inférieure à la pluie mesurée en forêt, les forestiers ne seront pas incités à multiplier ces expériences et accepteront comme définitive cette différence.

▪ Fabre (1902)

Fabre est inspecteur des Eaux et Forêts. Il représente une génération de forestiers formée à l'École Forestière de Nancy, et marquée par le succès des opérations de restauration des terrains en montagne (la première loi date de 1860). Il a beaucoup publié sur le reboisement dans les Pyrénées et, au-delà des effets indéniables sur la réduction de l'érosion des laves torrentielles, il veut pousser l'interprétation plus loin. Ainsi, il commente le fait que la Garonne n'est plus comme autrefois navigable « *presque depuis la frontière espagnole.* » Il l'explique de la façon suivante :

« Cette transformation si fâcheuse des conditions de navigabilité et de flottabilité ne nous est pas spéciale; c'est un fait général observé par tous les géographes, discuté par les hommes de science de part et d'autre de l'Atlantique. On l'attribue unanimement à l'extension contemporaine des cultures, aux déboisements et aux irrigations qui en ont été les conséquences. La forêt aide à la production des pluies, elle immobilise sur le sol une grande partie des eaux météoriques, facilite leur infiltration dans les couches profondes qui alimentent les sources, ralentit le ruissellement superficiel, s'oppose aux érosions torrentielles et subaériennes. D'où, pour les grands cours d'eau, relèvement des débits moyens, réduction des charriages détritiques, atténuation du tempérament torrentiel que la chirurgie hydraulique est incapable de guérir à elle seule, parce qu'elle ne traite pas la source même des alluvions. »

Dans le même style que Fabre, on peut citer les écrits de Chaudey (1921), conservateur des Eaux et forêts à Valence. Frappé par la différence de pluviométrie entre le plateau du Vivarais et celui du Vercors, il pense que le reboisement de l'Ardèche mettrait fin à la violence des pluies cévennoles.

▪ Jacquot (1909)

Pour compléter l'exposé du point de vue des forestiers, il n'est pas inutile d'examiner les messages qu'ils ont transmis au public. Pour cela, le recueil des « conférences populaires » faites par un forestier nommé Jacquot est éloquent. Il présente une quantité impressionnante de généralités invérifiables que certains forestiers se sont attachés à propager avec zèle, fort du succès des travaux RTM :

« Ce fait, la forêt fait pleuvoir, établi pour la première fois par l'école forestière de Nancy, est indubitablement corroboré par toutes les observations consignées en Russie, en Allemagne, Autriche, Suisse et jusque dans les Indes. »

« Si l'arbre fait la pureté de l'onde, il en fait aussi l'abondance. »

« Productrices d'humidité, réserves d'eau, les forêts animent les sources. Leur office est d'intérêt public. »

« Il n’y a pas de contradiction entre la suction des nappes souterraines par les arbres et la meilleure alimentation des sources. »

« Les forêts augmentent le débit moyen des rivières. »

Au début du 20^{ème} siècle, on peut considérer que la vision des forestiers ne variera plus : forts d’une expérience acquise dans des situations extrêmes sur des bassins versants dégradés par l’érosion torrentielle, ils considèrent pouvoir extrapoler ces résultats et conclure sur le rôle de la forêt dans tout bassin versant. Les expériences de Jeandel et al. (1862) et de Matthieu (1878) demandent à être poursuivies et répétées, pour pallier leurs imperfections. Cela ne sera pas fait en France et la vision des forestiers restera donc largement inchangée tout au long du 20^{ème} siècle.

Examinons à présent comment l’approche différente des ingénieurs a permis, au cours du 19^{ème} siècle, d’avancer de façon différente dans le domaine de la compréhension des influences forestières.

1.2.2 Le Parti des Ingénieurs

▪ Brémontier (1793, an V)

Brémontier, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, a été rendu célèbre par ses travaux sur la stabilisation des dunes. Là où tous les travaux de génie civil avaient échoué, il a mis en œuvre des travaux de stabilisation mécanique légère pour favoriser le développement de semis de pins et de genêts, qui ont permis de stopper l’avancée des dunes. Cette première démonstration de « génie écologique », si elle n’a pas de lien direct avec le rôle de la forêt sur l’écoulement et sur le climat, est à notre avis déterminante pour le développement des idées de Surell (1841), lui aussi ingénieur des Ponts et Chaussées, qui attaquera le problème de l’érosion torrentielle dans les Alpes.

Cézanne, l’élève de Surell écrira d’ailleurs en 1872 : « Il est juste cependant de citer ici, comme un premier pas fait antérieurement à la loi de 1860, la fixation des dunes de Gascogne, commencée en 1787, près de la Teste, par Brémontier, ingénieur des ponts et chaussées, interrompue en 1789, reprise en 1791, abandonnée en 1793, poursuivie sans interruption depuis 1801 et presque entièrement achevée aujourd’hui. »

▪ Surell (1841)

L’ouvrage classique de Surell, intitulé « *Etude sur les torrents des Hautes-Alpes* » traite essentiellement de la typologie des torrents, de leurs effets, des dommages qu’ils causent. Il ne s’intéresse pas d’emblée aux forêts dans la mesure où si « leur influence

M É M O I R E

S U R

L E S D U N E S,

Et particulièrement sur celles qui se trouvent
entre Bayonne et la pointe de Graye,
à l’embouchure de la Gironde ;

Par N. T. BREMONTIER,
Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.

À P A R I S,
DE L’IMPRIMERIE DE LA RÉPUBLIQUE.
Thermidor an V.

est incontestable, elles ne constituent pas une raison première, et elle [l'érosion torrentielle] eût été nulle sous un autre ciel et dans d'autres terrains. »

Lorsqu'il étudie les causes d'apparition (non pas d'existence) des torrents, il est cependant forcé de constater que, dans les Hautes-Alpes, « *la destruction d'une forêt livre le sol en proie aux torrents.* » Surell, observant des torrents éteints, en déduit également que « *les forêts sont capables de provoquer l'extinction d'un torrent déjà formé.* » Cependant, Surell reste très prudent et évite de théoriser ce rôle de la forêt. Il ne fait que constater le rôle positif de la forêt sur l'érosion, là où il l'a observé. Parlant de la littérature qu'il a consultée sur les dangers du déboisement, il écrit : « *comme il arrive toujours en France dans les questions à la mode, chacun renchérisait sur ce qui avait été dit avant lui ; et à force de chercher des raisons toujours nouvelles en faveur de la conservation des bois, on finit par en trouver de fort équivoques. [...] Mais cette exagération fut elle-même un grand mal. On se demanda bientôt si toutes ces influences attribuées au déboisement sur les variations de température, sur les pluies, sur les vents, sur la composition de l'air, etc., n'étaient pas tout au moins un peu douteuses. Insensiblement, tout le monde se refroidit, et la question, d'abord portée si haut, retomba doucement dans l'oubli. [...] Si la question eût été poursuivie ici, avec plus de patience et de mesure, on aurait aisément dégagé la vérité du milieu de quelques exagérations.* »

Surell pense qu'il aurait fallu procéder de la manière suivante : « *Tout en bornant la question aux pays de montagnes, il fallait la débarrasser de toutes ces disputes sur l'action climatérique que beaucoup de personnes ont attribué aux forêts ; car, en définitive, cette influence n'est pas rigoureusement démontrée, et on l'appuie sur des présomptions plutôt que sur des observations positives. Mais ce qu'il est impossible de contester, ce qui est au-dessus de toute équivoque, c'est l'influence qu'exercent les forêts sur la conservation du sol même de nos montagnes.* »

La prudence de Surell quant à l'influence climatique invérifiable de la forêt lui permet une grande souplesse dans ses propositions. Pour lui, la forêt n'est pas la seule couverture végétale imaginable dans la lutte contre l'érosion : « *Il est certain que beaucoup de terrains dépouillés d'arbres résisteraient aux affouillements, malgré leur défaut de consistance, s'ils étaient revêtus de prairies. [...] Mais les prairies ne succèdent pas ainsi aux forêts. A mesure que les arbres sont tombés sous la cognée, le terrain a été défriché, ou livré aux troupeaux, de sorte que les bois ont été convertis en champs labourés ou en pacages.* »

L'ouvrage de Surell est couronné par l'Académie des Sciences en 1842, et plusieurs lois pour encourager le reboisement des bassins versants des torrents seront proposées, notamment par Blanqui en 1847. En raison de la révolution et de l'instabilité politique qui l'accompagne, ce n'est que le 28 juillet 1860 qu'une première loi sur « le reboisement des montagnes » est votée. Cette loi sera suivie par une seconde sur « le gazonnement des montagnes » (8 juin 1864). Enfin, la loi du 4 avril 1882 sur « la restauration et la conservation des terrains en montagne » fournira un cadre définitif pour l'ensemble des travaux de conservations des sols qui se



poursuivent jusqu'aujourd'hui. Les propositions de Surell forment l'ossature de cet ensemble de lois.

▪ **Belgrand (1853, 1854a,b)**

Belgrand¹, Ingénieur Général des Ponts et Chaussées de grand renom, est particulièrement intéressant dans la mesure où il est le premier à remettre en cause l'opinion classique selon laquelle « *on doit arriver à une régularisation plus ou moins complète du régime des cours d'eau en reboisant leur bassin* ». Les arguments qu'il avance sont fondés sur des mesures limnimétriques et débitmétriques réalisées sur quatre bassins versants². C'est une grande première, dans la mesure où ses contemporains et ceux qui l'ont précédé se contentaient le plus souvent d'observations qualitatives ponctuelles, de récits d'historiens ou de voyageurs. De ses mesures, il déduit que bassins boisés et dénudés se comportent de façon similaire, et qu'aucune régularisation significative du régime n'est à attendre du reboisement : « *je conclus de tous ces faits, et de beaucoup d'autres, que les bois ne sont point de nature à retarder beaucoup le ruissellement des eaux pluviales.* » Nous relatons en détail l'expérience de Belgrand en Annexe I.1 dans la mesure où elle constitue, avec l'expérience de Jeandel *et al.* (1862), la première expérimentation « moderne » mise en place pour déterminer l'impact de l'occupation des sols sur le fonctionnement des bassins versants.

Les conclusions de Belgrand se résument ainsi : « *les forêts, pendant la saison où elles sont couvertes de feuilles, diminuent plutôt qu'elles n'augmentent le débit des ruisseaux et empêchent les crues, à cause de la portion d'eau pluviale qui s'arrête sur leur feuillage, et qui, s'évaporant, est perdue pour le sol.* »

▪ **Vallès (1857, 1862, 1865)**

L'ingénieur en chef des Ponts et Chaussées Vallès est un ardent ennemi du parti des forestiers, ce qui explique qu'il concentre sur lui l'essentiel de leur animosité. Pourtant, ses intentions paraissent louables : « *ce que nous voulons, tant pour nous même que pour nos adversaires, c'est qu'on ne se borne pas à se contenter d'assertions, d'opinions préconçues, et qu'on veuille bien entrer enfin dans l'étude des faits et des preuves propres à justifier des croyances qui sont admises partout, il est vrai, mais ne sont justifiées nulle part* ».

¹ Eugène Belgrand (1810-1878) est une grande figure de l'hydrologie du XIX^{ème} siècle. Entré à l'Ecole Polytechnique en 1829 et à l'Ecole des Ponts et Chaussées en 1831, il s'intéresse à l'hydrologie et étudie les relations existant entre la constitution géologique du sol et le régime des eaux. En 1846, il fait présenter par Arago à l'Académie des Sciences ses *Etudes hydrologiques dans la partie supérieure du bassin de la Seine*, mémoire qui établit sa réputation de savant. Il est attaché en 1845 au service de l'Yonne à Avallon. Haussmann, préfet de l'Yonne, le remarque ; devenu préfet de la Seine, il appelle Belgrand au service de la ville et le charge d'étudier les possibilités de développement de l'approvisionnement en eau de la capitale, le nommant, en 1852, au service de la navigation de la Seine entre Paris et Rouen. En 1867, il reçoit le titre de directeur des eaux et égouts de Paris; il dirige la réalisation du grand réseau d'égouts qui contribua notablement à l'assainissement de la capitale. Il fait construire les aqueducs de l'Arve et de la Vanne pour l'alimentation en eau de Paris. En outre, il dirige pendant douze ans le service hydrométrique du bassin de la Seine, service qui sert de modèle aux services comparables organisés plus tard dans les autres bassins des grands fleuves de France et qui permet d'établir un système d'annonce des crues.

² Le bassin versant du Cousin à Avallon, deux de ses affluents (le ruisseau de la Grenetière et le ruisseau du Bouchart) et le bassin versant de l'Ource affluent de la Seine.

Il est intéressant de voir comment il présente l'état général des croyances dans l'opinion. D'après lui, l'opinion publique est convaincue que :

- l'existence des forêts diminue l'intensité des inondations, leur disparition les aggraverait ;
- il pleut plus sur les forêts ;
- les sources sont plus abondantes avec les forêts, se tarissent quand la culture s'étend.

Or, il pense pour sa part que :

- « l'existence des forêts, loin de diminuer les inondations, les augmente » ;
- « c'est sur les terrains dénudés, plutôt que sur les forêts, que la pluie tombe en plus grande abondance » ;
- « l'arrosage du globe par les sources est d'autant moins assuré que la végétation forestière a plus d'étendue ».

Avec un tel programme, l'affrontement avec les forestiers est inévitable... Et il faut dire que ceux-ci lui facilitent la tâche, avec une argumentation qui se fonde pour l'essentiel, comme nous l'avons vu, sur les récits des historiens de l'Antiquité, et sur le constat du recul de certaines cultures, (vigne, oranger et olivier) en limite de leur zone de culture. Il invoque des raisons économiques liées au développement des échanges (qui paraissent effectivement beaucoup plus probables) et se moque de ceux qui citent les historiens grecs et romains : « Aux yeux de beaucoup de personnes, lorsque l'histoire nous apprend qu'une ville, jadis florissante, a disparu sous des ruines, qu'une terre autrefois fertile ne donne plus de produits, la faute en est toujours et uniquement au déboisement. »

Cependant, alors même qu'il critiquait avec justesse le manque de preuves et d'observations présentées par le parti des forestiers, il n'apporte pas pour sa part d'arguments réellement convaincants. Il a, lui aussi, des thèses mal justifiées : il soutient par exemple que le sol des forêts est plus tassé que le sol des champs (les racines comprimant les pores du sol) et que, c'est d'ailleurs la raison pour laquelle le sol forestier est moins sujet à l'érosion. En conséquence, moins d'eau s'infiltre, et pendant une averse, l'eau court à une plus grande vitesse à la surface du sol forestier. Et il déduit logiquement que la forêt... aggrave les inondations.

D'autre part, Vallès considère que le sous-sol des forêts est moins perméable que celui des champs. Il ne veut pas croire à une augmentation de la porosité du sol par les racines des arbres. En fait, son point de vue est que « dans les forêts, la permanence ou, si l'on veut, la plus grande persistance de l'humidité à la surface doit être infailliblement l'indice que le soutirage inférieur ne s'opère que dans une très faible proportion et que, par suite, les couches sous-jacentes y possèdent incontestablement une plus grande compacité que dans les champs ». Il en déduit un effet négatif sur l'alimentation des sources. Il rappelle que même si l'on considère que forêts et champs ont même porosité, la consommation en eau supérieure des arbres peut suffire à réduire le débit des sources.

Enfin, pour ce qui est de l'augmentation des précipitations au-dessus des forêts, il trouve un contre-exemple à ceux cités par les forestiers, sous la forme d'observations effectuées dans le Vivarais, où la pluie a augmenté entre 1778 et 1817, alors même que les bois ont reculé...

▪ **Champion (1858)**

Champion est l'auteur d'une histoire monumentale intitulée « *Les inondations en France depuis le VI^e siècle jusqu'à nos jours* », en six volumes. Les recherches historiques qu'il publie entre 1858 et 1863 viennent à point dans un débat qui a tendance à considérer crues et inondations comme une conséquence exclusive des récents défrichements, et l'auteur avance son point de vue à ce sujet dès l'avant-propos :

« *Si, par cette publication, nous avons eu pour but de remplir la lacune d'érudition dont nous parlions tout à l'heure, peut-être en ressortira-t-il aussi quelques arguments contre certaines opinions formulées, à notre avis, d'une manière trop exclusive. N'a-t-on pas dit que « le fléau des inondations était nouveau en France et que le déboisement en était la cause.»*

Ces propositions, communément adoptées, sont loin d'être ratifiées par l'évidence historique. A toutes les époques, notre pays a eu à souffrir des inondations non moins effroyables, relativement, que celles dont nous avons été les témoins, et les contrées qui, sous nos yeux, ont été ravagées par les eaux, n'ont jamais été exemptes de cette calamité. Les débordements de nos principaux fleuves, de nos rivières, datent des premiers siècles de la monarchie. C'est là une vérité incontestable, appuyée de preuves authentiques.

En compulsant attentivement, pour remonter le plus haut possible dans notre histoire, les Annales que nous a léguées le premier Chroniqueur des Francs, on trouve déjà de son temps, le fléau de l'inondation existant avec un caractère tout aussi impétueux qu'à présent. On le voit apparaître souvent et se succéder même avec une véritable périodicité. Ainsi, dans l'espace de douze années, Grégoire de Tours mentionne jusqu'à six débordements. N'est-il pas permis de croire, d'après cela, que les inondations durent être fréquentes au moyen âge ?

On ne s'est pas assez préoccupé de cette époque lorsqu'on a avancé et soutenu des théories systématiques sur les causes des inondations et surtout lorsqu'on les a attribuées au déboisement. »

Si Champion semble clairement avoir choisi le parti des ingénieurs, il n'en demeure pas moins très mesuré et objectif. Il présente notamment de la façon suivante la diversité des opinions au sein de la communauté des ingénieurs : « *Beaucoup d'ingénieurs distingués, entre autres MM. Defontaine, Dupuit, Duponchel, Vallès, de Mardigny, Belgrand et beaucoup d'autres, ont contesté que les crues des rivières soient devenues plus fortes à mesure que les forêts ont diminué ; Lecreulx dit même « que l'effet contraire serait plus vraisemblable. » [...] Cependant d'autres ingénieurs, M. Surell en tête, n'ont pas hésité à voir dans le déboisement des montagnes la principale cause des inondations. MM. de Montrond et de Saint-Venant partagent cette opinion. »*

▪ **Cézanne (1872)**

Cézanne a rédigé une suite au livre de Surell, qui est publiée en 1872 en tant que second tome. Dans cet ouvrage, qu'il intitule tout simplement « *Suite de l'étude sur les torrents des Hautes-Alpes* », il commence par discuter avec beaucoup de détails les diverses opinions répandues sur le rôle de la forêt. Il aborde en premier l'impact de la forêt sur le climat, en cherchant si l'on peut conclure que le déboisement a modifié la température moyenne de l'année. Après une revue extensive de la littérature, où il ne

manque pas de relever le manque de mesures fiables, les contradictions de certains auteurs et les preuves trop sommaires, il conclut : « *On conçoit qu'un problème ainsi posé ne peut être résolu que par des observations poursuivies pendant une longue série d'années, avec des circonstances locales très difficiles à rencontrer. Il faut se hâter de couvrir d'observatoires l'Amérique et la Russie, et peut-être, dans quelques siècles, aura-t-on des idées nettes sur l'influence du déboisement.* »

Cézanne aborde ensuite la question de l'impact des forêts sur la pluviosité. Examinant les résultats des expériences faites par A. Matthieu à l'École Forestière de Nancy, il conclut : « *D'après ce que nous avons vu plus haut des caprices de la pluie et des variations qu'elle présente, d'un quartier à l'autre d'une même ville, il faut reconnaître que les expériences de M. Matthieu, tout en fournissant un argument en faveur d'une action des forêts sur le phénomène de la pluie, ne sont pas complètement démonstratives. [...] Pour que les expériences fussent concluantes, il faudrait que, renouvelées sur un grand nombre de points, elles fussent toujours concordantes. Mais cette concordance ne se rencontre pas.* » Cézanne conclut donc que « *les forêts sont impuissantes à modifier sensiblement la quantité d'eau pluviale qui tombe dans le bassin d'un fleuve.* »

Arrivant enfin à l'impact des forêts sur l'hydrologie des cours d'eau, Cézanne considère successivement l'influence forestière sur l'évaporation, l'infiltration et le ruissellement. Pour l'évaporation, il relate des expériences destinées à évaluer l'interception des arbres, et discute de l'importance relative de la réduction de l'évaporation due à l'ombrage du sol, de la transpiration des arbres, et de l'interception de la pluie. La limitation de l'évaporation semble être pour lui l'effet dominant (c'est là où il diverge de Belgrand et de l'opinion des hydrologues modernes).

Quand il examine l'effet de la forêt sur l'écoulement à l'échelle du bassin versant, Cézanne conclut que la forêt réduit et ralentit les crues moyennes, par rapport à un bassin dénudé, grâce à l'interception de son feuillage et la capacité de stockage de son sol. Mais elle est sans effet sur les crues majeures : « *En ce qui concerne spécialement l'écoulement des eaux et les inondations, il est évident que le rôle des forêts a été exagéré. Les crues sont antérieures au déboisement ; lors même qu'on reboiserait la France entière, on ne serait pas assuré de mettre à l'abri du fléau les propriétés qui y sont exposées.* »

1.2.3 Débat entre les deux factions au long du 19^{ème} siècle

Parcourir comme nous venons de le faire les arguments des différentes parties donne une vision du débat qui reste un peu statique. Pour essayer d'en reconstituer le caractère dynamique, nous avons essayé de rassembler dans cette section des témoignages des discussions qui ont opposé les deux partis au cours du 19^{ème} siècle.

En préambule, pour bien montrer que le débat sur l'influence de la forêt sur le climat et sur les eaux ne se limite pas à un petit nombre de forestiers et d'ingénieurs, on peut citer la circulaire n°18 du 25 avril 1821, émise par Siméon, Ministre de l'Intérieur de Louis XVIII (Bainville et Ladoy, 1995). Cette circulaire donne à l'Académie Royale des Sciences la mission d'étudier l'effet sur le climat des déboisements et les défrichements effectués dans le pays depuis le début de la

Révolution¹. Siméon s'adresse ainsi aux préfets du royaume : « depuis quelques années, nous sommes témoins de refroidissements sensibles dans l'atmosphère, de variations subites dans les saisons et d'ouragans ou d'inondations extraordinaires auxquels la France semble devenir de plus en plus sujette. On l'attribue en partie aux déboisements des montagnes, aux défrichements des forêts, au défaut d'abri qu'éprouvent nos campagnes, et à l'absence des obstacles naturels qui s'opposaient jadis aux vents et aux nuages du nord et de l'ouest.[...] Dans l'état actuel des observations, il est peut-être difficile d'asseoir un jugement; et c'est pour fixer mon opinion, pour voir ensuite quelles dispositions ordonner, que je viens vous demander des notes sur les divers points qui suivent :

1°- Quelles forêts existaient dans votre département il y a trente ans? Dans quelle zone et à quelle élévation étaient-elles placées? Quelles étaient leur étendue et l'espèce d'arbres dont elles étaient formées?

2°- Quels étaient les propriétaires?

3°- Quelles sont celles qui existent encore et celles qui ont été abattues?

4°- Quelle influence a-t-on remarqué que la différence exerçât sur le système météorologique du département? Les rivières ont-elles eu des eaux plus ou moins abondantes? Les inondations, les pluies ont-elles été plus ou moins fréquentes? Y a-t-il eu plus souvent de la neige ou de la grêle, et, dans les pays de montagnes s'est-on aperçu que les glaces descendissent à plus basses régions, repoussant et refoulant la végétation vers les plaines ou les vallées?

5°- Les vents ont-ils été plus violents, plus malfaisants, plus variables, et a-t-on remarqué que ceux du sud ou du nord exerçassent tout-à-coup, et par de soudains changements, de plus grands ravages que dans le siècle dernier, et lorsque la France enfin était mieux boisée? »

Les *Annales Européennes*, qu'édite François Rauch, reproduisent immédiatement la circulaire de Siméon, estimant que « cet acte est peut-être le plus capital qui soit jamais sorti du Ministère [de l'intérieur]. » De 1821 à 1824, alors que les réponses arrivent progressivement, Rauch les publie et les accompagne de commentaires. Il n'hésite pas à fustiger certains préfets, tel celui du Lot, qui déclare (*Annales Européennes*, Tome III) que les végétaux n'ont dans son département pas d'influence sur le climat.

La séance du 16 février 1824 de l'Académie Royale des Sciences fait la synthèse des informations recueillies. De la description qu'en donnent Bainville et Ladoy (1995), il semble bien que les Académiciens soient restés perplexes devant l'hétérogénéité des rapports, le manque de données chiffrées, la diversité des avis sur les effets météorologiques des déboisements, pour conclure enfin qu'il « n'a pas été trouvé de preuves assez positives ni assez complètes des faits contestés pour émettre une opinion. »

Le débat ne s'éteint pas pour autant : en témoigne une discussion entre Arago et Gay-Lussac (Becquerel, 1853; Cézanne, 1872) à l'occasion de la discussion du code forestier en 1836. Ce débat illustre les doutes qui subsistent sur le rôle des forêts sur le climat auprès de certains grands scientifiques :

¹ D'après Bainville et Ladoy (1995), des « anomalies » climatiques ont précédé cette circulaire : gel des oliviers durant l'hiver 1819-1820, sécheresse de 1815, pluies diluviennes de 1816, des extrêmes à ajouter à ceux rapportés par Rougier de la Bergerie (1800, an IX).

Arago aurait ainsi déclaré : « si l'on abattait un rideau de forêts sur la côte maritime de la Normandie ou de la Bretagne, ces deux contrées deviendraient accessibles aux vents d'ouest, aux vents tempérés venant de la mer. De là une diminution dans le froid des hivers. Si une forêt pareille était défrichée sur la côte orientale de la France, le vent d'est glacial s'y propagerait plus fortement, et les hivers seraient plus rigoureux. La destruction d'un rideau de bois aurait donc produit çà et là des effets diamétralement opposés. »

A cela, Gay-Lussac aurait répondu : « A mon avis, on n'a acquis jusqu'à présent aucune preuve positive que les bois aient par eux-mêmes une influence réelle sur le climat d'une grande contrée ou d'une localité particulière. En examinant de près les effets du déboisement, on trouverait peut-être que, loin d'être un mal, c'est un bienfait ; mais ces questions sont tellement compliquées, quand on les examine sous le point de vue climatérique, que la solution est très difficile, pour ne pas dire impossible. »

La Revue des Eaux et Forêts, créée en 1862, va entrer dans le débat dès le début de sa parution. Voici les objets de la revue tels qu'on les trouve définis en page de couverture : « économie forestière, reboisement, bois de marine, commerce des bois, chasse, louveterie, **régime des eaux**, pêche, pisciculture, métallurgie, législation et jurisprudence. » Dans le premier numéro, le rédacteur en chef A. Frézard annonce son intention de consacrer dans sa revue « une très large place à l'application de la loi du 28 juillet 1860, loi qui, croyons-nous, fera date dans l'histoire de la sylviculture. »

L'affrontement entre forestiers et ingénieurs semble atteindre son paroxysme à la fin du second empire, avec l'intervention dans le débat d'une personnalité politique de tout premier plan, le maréchal Vaillant, ministre de la maison de l'Empereur de 1860 à 1870. Dans une lettre qu'il adresse en 1865 à l'ingénieur en chef des Ponts et Chaussées Vallès, et que la revue des Eaux et Forêts publie, il exprime le souhait de voir lever les incertitudes sur « l'influence des forêts comme cause permanente de sécheresse ou d'humidité. » Les observations et les expériences du maréchal manifestent l'intérêt qu'il a pour la question, tout en indiquant une solide formation scientifique et un esprit d'analyse avéré. Il conclut que l'« on n'a peut-être pas assez étudié cette action [des forêts] au point de vue tout spécial du dessèchement du sol qu'elles recouvrent et de l'appauvrissement qui peut en résulter pour les sources. [...] Il y a là, je le crois, un service à rendre, peut-être des préjugés à détruire et des vérités à mettre en lumière. » Les forestiers n'aiment pas Vallès, qui est connu pour les arguments qu'il a publiés en 1857 dans son *Etude sur les inondations*. De plus, ce dernier a publié en 1862 dans les *Annales des Ponts et Chaussées* une critique très sévère de l'expérimentation mise en place par Jeandel et al. (1862) (voire Annexe I.1). Mais nul ne peut s'opposer aux souhaits de son puissant protecteur...

Nous ne savons pas si Vallès put s'occuper de mettre en place des expériences sur ce thème avant la fin de l'Empire et l'exil du maréchal Vaillant en Espagne. La revue des Eaux et Forêts ayant lancé un appel à ses lecteurs pour qu'ils lui fassent parvenir des témoignages pour contribuer au débat (disons surtout pour contrer Vaillant et Vallès), elle va publier dans les deux années qui suivent de nombreuses observations émanant de forestiers, présentées pour prouver que la forêt a une influence exclusivement bénéfique sur le régime des eaux. Mais ces observations sont toujours vagues et les raisonnements qui les accompagnent restent peu convaincants.

La fin du second Empire semble mettre fin au danger auquel sont exposées les thèses des forestiers, qui reprennent progressivement de l'assurance. Quelques années plus tard, ils n'hésitent même plus à critiquer Surell (pourtant considéré comme le père fondateur des travaux RTM). Ce sont les réserves de ce dernier, très prudent sur le rôle climatique et hydrologique de la forêt, qui lui valent les critiques d'un défenseur passionné comme Fabre (1904) : « *Etranger, comme Belgrand, aux questions purement physiologiques, Surell conteste à diverses reprises l'action hydrologique de la forêt.* »

Quelle a été l'issue du débat ? Il semble bien que, dans la mesure où ils avaient reçu la charge des travaux RTM, le dernier mot soit resté aux forestiers¹. Ces derniers réalisent des merveilles sur le terrain, mais manquent de connaissances hydrologiques et surtout de moyens financiers pour tester leurs théories sur l'impact hydrologique de la forêt à l'échelle d'un petit bassin versant². La nature spectaculaire des boisements aidant, le public est bientôt conquis par les clichés publiés ou exposés : ainsi, une importante publicité sur la réussite du reboisement est faite au cours de l'exposition universelle de Paris en 1878 (Demontzey, 1894). A l'issue de ce débat qui a duré un siècle, aucun des deux partis n'a emporté de victoire décisive sur l'autre... mais les forestiers ont eu le dernier mot.

1.2.4 Le débat en France vu de l'étranger

Il peut être instructif d'observer le débat français sur le rôle météorologique et climatique de la forêt depuis l'étranger, afin d'en avoir une vision moins passionnée et peut-être plus objective. Pour cela, nous avons eu recours à deux sources célèbres : le professeur Ernst Ebermayer, forestier et bioclimatologue allemand de renom, et

¹ Il est intéressant de citer ce que Cézanne écrivait à ce sujet dès 1872 : « *Quelques ingénieurs peuvent regretter que le corps des Ponts et Chaussées reste étranger à ces résultats dont la conquête prochaine est due, en grande partie, à l'initiative de l'un de ses membres [Ndlr : Surrell] ; mais il suffit de visiter les lieux et de réfléchir aux données complexes du problème pour reconnaître qu'un torrent, être vivant et personnel, ne peut être traité par deux administrations.*

Or, si des deux administrations, une seule doit être exclusivement chargée de l'œuvre, il est incontestable que cette tâche revient à l'administration des forêts. Il y a sur la planète du travail pour tous, et, applaudissant sans arrière pensée aux heureux efforts des forestiers qui sont désormais leurs émules dans l'art des travaux hydrauliques, les ingénieurs peuvent se réjouir que deux d'entre eux [Ndlr : Brémontier et Surrell] aient, par leurs études forestières, attaché leur nom, l'un à la fixation des dunes, l'autre à la régénération des Alpes. »

² Il ne faut pas croire cependant que les forestiers n'aient pas compris la nécessité de valider par des mesures l'effet de leurs travaux. Ainsi Demontzey (1882) écrit : « *jusque-là, personne n'a songé à mesurer la quantité d'eau que peut jeter dans son bassin un orage violent pendant un temps donné ; on ignore la durée de la crue correspondant à cet orage, la quantité d'eau écoulée, le volume des matériaux arrachés, charriés et déposés. [...] A défaut de ces données, qui seraient du plus haut intérêt pour l'exécution des travaux, on peut du moins entreprendre dès le début les études nécessaires pour se les procurer successivement dans l'avenir. Au bout d'un certain nombre d'années [...], on aura obtenu par les observations ainsi faites, une série de rapports successifs entre la masse d'eau tombée sur le bassin de réception et les effets produits dans le torrent et le cône, rapports qui fourniront d'abord des données précieuses sur les degrés successifs de l'efficacité des travaux en cours d'exécution.* » Malheureusement, Demontzey note que si la mesure de la pluie ne pose pas de problèmes, « *la mesure de la quantité d'eau écoulée et des matériaux entraînés est beaucoup plus difficile ; on peut même affirmer qu'elle est impossible [...] au moins tant que le torrent charrie des matériaux.* »

Gifford Pinchot, le premier directeur de l'US Forest Service. Ce dernier connaît très bien la France, car il a fait ses études à l'ENEF à Nancy.

Ebermayer (1879)

Dans un article paru en 1879 et intitulé « *Comment évaluer l'influence des forêts sur l'abondance des sources?* » (article traduit en Annexe I.4), le Professeur Ernst Ebermayer se fait l'écho du débat qui oppose forestiers et climatologues en Allemagne comme en France. Il cite des informations du célèbre météorologue français Marié Davy, qui soutient que « *les terrains nus transmettent, vu leur faible pouvoir d'évaporation à la surface, une plus grande quantité d'eau vers les nappes et canaux souterrains et contribuent ainsi à alimenter les sources et les ruisseaux de façon plus consistante que ne le font les forêts qui consomment, surtout en été, tant d'eau qu'elles ne peuvent, en cette saison, avoir une influence notable ni sur les sources ni sur les rivières.* » Les forestiers allemands sont clairement opposés à de telles affirmations, et Ebermayer rappelle notamment que « *la commission d'hydrologie du Ministère de l'Agriculture à Berlin, réunie en juillet 1877 sous la présidence du ministre Dr. Friedenthal, avait déjà conseillé aux météorologues forestiers de mettre en oeuvre tous les moyens et procédés possibles permettant, sur la base d'observations et d'expériences, de réunir des indices et des faits susceptibles de trancher dans cette question.* » Ernst Ebermayer propose pour sa part une expérience destinée à éclaircir le débat : devant l'impossibilité de construire de véritables lysimètres forestiers, il propose de creuser des galeries drainantes sous une forêt et sous une culture, afin de recueillir l'eau s'infiltrant dans le sol et de pouvoir ainsi estimer la contribution de chacun des modes d'occupation du sol à l'abondance des sources. Cette expérience semble intéressante, quoique difficile à mettre en oeuvre et à interpréter, dans la mesure où le débit d'une telle galerie serait plus directement lié à la géométrie de la nappe temporaire ou permanente qui serait drainée, et moins directement à la quantité d'eau infiltrée sous la couche racinaire. Pourquoi Ebermayer n'a-t-il pas pensé à comparer l'écoulement de surface de deux bassins versants distincts, comme cela sera fait en Suisse¹ à partir de 1901 (Engler, 1919)? Nous ne pouvons pas le dire. Nous ne savons pas non plus si l'expérimentation proposée par Ebermayer fut réalisée. Quoiqu'il en soit, l'auteur se montrait confiant sur la faisabilité, concluant que « *vu l'importance multiple de ces expériences, la question du coût, non négligeable, d'une telle opération ne devrait pas constituer un obstacle à sa réalisation, d'autant plus que d'énormes sommes sont souvent attribuées à des expériences qui n'ont absolument pas la même importance socio-économique que la nôtre.* »

Pinchot (1905)

Dans son célèbre livre « *A primer of forestry* », Pinchot (1905) décrit le débat en France de manière très intéressante. Au sujet de l'origine du débat lui-même, il écrit : « *The discussion of forest influence on climate began in this way. When the French revolution broke out in 1789, the old restrictions on the management of private forests were done away. A wholesale cutting of these timberlands promptly followed, and as early as 1792 the consequences began to be observed. The question of forests and climate was then raised for the*

¹ A ce sujet, il serait intéressant de savoir si l'expérience d'Engler a été inspirée par Ebermayer.

first time; but questions of this kind can not be answered without long and careful observations. »

Au sujet de l'influence de la forêt sur la pluviosité, il écrit : « *It is unfortunate that so much of the writing and talking upon this branch of forestry has had little definite fact or trustworthy observation behind it. The friends and the enemies of the forest have both said more than they could prove. Both have tried to establish the truth of their opinions by referring to observations of temperature and rainfall which cover too short a time to prove anything, or by hearsay and general impressions, which are not to be trusted in such matters. Such discussions make nothing clear except that the pith of the matter has not been reached by either party. »*

Pinchot paraît d'ailleurs très bien informé sur la difficulté des études de pluviométrie, qu'il commente de la façon suivante : « *A great number of observations has been made in different parts of the world to discover how much the rainfall really is affected by the forest, but for several reasons no generally accepted result has yet been reached. In the first place, accurate observations on rainfall are not easy to make. The height above the ground at which a rain gauge is placed affects it very seriously. A variation of 10 feet in height will often make more difference in the amount of rain caught than most observers claim for the whole action of the forest. »*

Il apparaît également qu'il a suivi non seulement les travaux des forestiers français, mais aussi des allemands, et il cite notamment des mesures contradictoires réalisées en Bavière et en Prusse, l'une semblant n'indiquer aucune influence de la forêt sur la pluviosité, l'autre semblant indiquer une augmentation de la pluviosité liée à la présence de forêt. Il conclut de la façon suivante : « *The best evidence at hand fails to show a decrease in rainfall over the United States in the last hundred years, in spite of the immense areas of forest that have been burned and cut.[...] The truth probably is that more rain falls over the forest than over open country similarly placed, but how much more it is impossible to say. [...] One of the best authorities has estimated the differences at 10 per cent. »*

1.3 Etat actuel de l'opinion publique

C'est en parcourant les titres parus dans la presse à la suite d'événements hydrologiques extrêmes que l'on peut se rendre compte combien les idées véhiculées par le parti des forestiers au 19^{ème} siècle (et reprises encore aujourd'hui par une part importante des forestiers français), imprègnent encore profondément l'opinion publique française.

Ainsi, on a pu trouver dans Paris-Match, à l'occasion des crues de l'Aude de septembre 1999, un article dont le titre était : « *Un impératif : limiter la déforestation qui aggrave le ruissellement des eaux. »* L'article ne fait pourtant quasiment pas allusion au problème de la déforestation, mais s'attarde plutôt sur la nécessité de développer des services d'alerte. Cependant, pour le public, l'affaire est entendue : la déforestation est désignée comme coupable potentiel, ce qui prête à sourire lorsque l'on sait que le taux de boisement de la Montagne Noire est en constante augmentation depuis la fin de la seconde guerre mondiale.

Dans le rapport de la « Commission d'enquête sur les causes des inondations et les moyens d'y remédier » (dit rapport Mariani) de 1994, on peut lire des phrases telles que :

« La forêt joue un rôle écrêteur et retardateur de crue qui est loin d'être négligeable. »

« Dans le sud du département du Vaucluse, par exemple, le déboisement lié aux besoins de la viticulture a eu des effets désastreux au moment des inondations de 1993. »

« Beaucoup moins virulent aujourd'hui, le débat sur les conséquences néfastes du déboisement n'en demeure pas moins d'actualité. »

Ces opinions, qui représentent les dires des experts entendus par la commission d'enquête parlementaire, ne font finalement que traduire l'état de l'opinion publique.

Des oeuvres littéraires, d'inspiration plus romantique que scientifique, contribuent aussi à diffuser l'idée d'une forêt protectrice de la ressource en eau : on peut citer le beau roman de Jean Giono, *L'homme qui plantait des arbres* (1953), où le romancier relate l'histoire¹ d'un paisible vieillard qui, plantant sans relâche des arbres, allait rendre vie à une contrée aride et désolée : « *les vieilles sources, alimentées par les pluies et les neiges que retiennent les forêts, se sont remises à couler.* »²

Quant aux ouvrages de vulgarisation sur les forêts tels que ceux de Badré (1983) et de Larrède et Nougarede (1993), ils continuent à faire circuler la même image idyllique et romantique de la forêt qui amortit les crues « *en freinant le ruissellement, en retenant l'eau et en facilitant l'infiltration dans le sol* ».

Les anciennes idées sont bien difficiles à faire évoluer. Déjà en 1872, Cézanne analysait avec beaucoup de pertinence le problème : « *D'où vient que les préjugés populaires, sans s'accorder sur le sens dans lequel agit le déboisement, s'accordent pour lui accorder une grande influence sur le climat ?* » Pour Cézanne, cela vient de la difficulté qu'a l'esprit humain de comprendre la variabilité du climat : « *Ainsi, dans le climat, sa variabilité nous frappe et sa constance nous échappe.* » Et s'il y a un effet supposé, on doit en chercher le coupable : « *notre esprit, dès qu'on lui montre un effet, réclame impérieusement une cause ; et même, dans son impatience, il n'attend pas toujours que l'effet soit constaté et suffisamment établi pour en chercher la cause.* » Cézanne note alors avec justesse que l'opinion aura beaucoup de difficulté à croire à une cause astronomique ou géologique pour les variations de climat, tant la confiance en l'immuabilité des

¹ Ce récit, totalement inventé par Giono, a été le sujet d'une méprise célèbre : en 1953, un magazine américain, *The Reader's Digest*, avait demandé à Giono un texte pour sa série : « *le personnage le plus inoubliable que j'ai rencontré.* » Giono inventa alors l'histoire d'Elzéard Bouffier, personnage qu'il dit avoir connu et fréquenté, et qu'il présenta comme un homme qui avait, des années durant, planté des milliers d'arbres et ainsi rendu à la vie une région frappée par la sécheresse. Enquêtant sur l'authenticité de l'histoire, l'envoyé du *Reader's Digest* s'était aperçu que ce personnage n'avait jamais réellement existé.

² Giono rappelle le ton poétique d'Élisée Reclus (1869), dans son *Histoire d'un ruisseau* : « *des sapins et des hêtres entremêlés croîtront sur les flancs de la montagne d'où s'épanchent les premières eaux ; les racines saillantes, les mousses qui les recouvrent, les herbes qui les entourent et que la dent de la chèvre ne viendra plus arracher, arrêteront dans leur descente les gouttelettes de pluie et les filets de neige fondue ; au lieu de s'écouler en torrents d'une heure, l'eau suintera dans l'intérieur du sol pendant les pluies, et, descendant lentement de pore en pore, réparaitra dans le lit inférieur du ruisseau à l'époque des sécheresses.* »

lois naturelles est grande. Et l'explication « sera d'autant plus attrayante, d'autant plus acceptée, si elle impute la détérioration du climat à quelque méfait de l'espèce humaine, et particulièrement de ceux qui ont assuré la lourde charge du gouvernement. » Cent trente ans après la publication de Cézanne, rien ne semble avoir changé... Pourtant, les sciences hydrologiques, et l'hydrologie forestière en particulier, ont réalisé des avancées importantes, dont la revue critique constitue le sujet du chapitre 2.

2 UNE REVUE DE LA LITTÉRATURE SCIENTIFIQUE DU VINGTIÈME SIÈCLE

2.1 Les débuts des bassins versants expérimentaux

On peut considérer que le problème de l'influence de la forêt sur le cycle de l'eau n'a pu être approché de façon scientifiquement satisfaisante que grâce à la mise en place de bassins versants expérimentaux. A qui faut-il attribuer le mérite de leur invention? Les historiens de l'hydrologie McCulloch et Robinson (1993) reconnaissent la préexistence d'une recherche suisse, qu'ils qualifient de « *first true catchment study* »: il s'agit de l'expérience des bassins du Sperbelgraben et du Rappengraben (Engler, 1919), débutée en 1900 et achevée en 1919. Malgré tout le respect qu'il faut avoir pour le travail d'Engler - imposant tant par la durée des observations comme par le soin qui a été apporté à leur collecte - et pour l'opinion de McCulloch et Robinson, il nous a semblé juste de rétablir ici la paternité de la « *première vraie étude de bassin versant* » : nous proposons de l'attribuer collectivement à Belgrand (1853) et à Jeandel *et al.* (1862), dont nous avons déjà abordé au Chapitre 1 le rôle dans le débat qui a opposé les ingénieurs des Ponts et Chaussées aux officiers des Eaux et Forêts. Cependant, ces trois expériences restent fondées sur des comparaisons de bassins versants différant par leur couvert, aucune ne permet donc d'apporter un éclairage scientifique incontestable sur la question de l'influence de la forêt sur le cycle de l'eau. Nous avons préféré les commenter en Annexe I.1.

Le développement des bassins versants de recherche sur des bases expérimentales convenables doit être mis au crédit des forestiers américains : ce sont eux qui, pour la première fois en 1910, ont mis en œuvre le principe des bassins versants appariés, qu'ils ont ensuite massivement et systématiquement repris des années 30 aux années 70 sur l'ensemble du territoire des Etats-Unis. Nous présentons donc ci-dessous cette expérimentation fondatrice.

2.2 Invention de l'approche des bassins versants appariés à Wagon Wheel Gap

Les mesures hydrologiques et météorologiques entreprises par le US Forest Service à Wagon Wheel Gap dans le Colorado, ont duré de 1910 à 1926. Après avoir suivi deux bassins adjacents (respectivement de 0.90 et 0.81 km²) pendant huit années, l'expérimentation a consisté à récolter par coupe rase l'ensemble de la végétation ligneuse de l'un des bassins (« bassin traité »), tout en conservant au second (« bassin de contrôle ») son état originel. Ainsi, les relations développées entre le comportement des deux bassins au cours des huit premières années permettent de reconstituer pour la période post-traitement ce qu'aurait été l'écoulement « naturel » du bassin traité, et donc d'évaluer l'impact hydrologique de la suppression du couvert forestier (Bates et Henry, 1928).

L'expérimentation, menée avec des moyens humains et matériels considérables, a mis en évidence une augmentation de la crue de fonte des neiges (les bassins se trouvent à une altitude moyenne de 3100 m) de près d'un tiers dans le bassin traité.

Le maximum du débit moyen journalier a été augmenté de 50%. De plus, la fusion nivale a été avancée d'une douzaine de jours par la coupe de la forêt.

Le rendement en eau du bassin traité est passé de 29 à 34%, et les étiages ont été augmentés : c'est à dire que contrairement à ce que semblaient montrer les mesures d'Engler (1919), la disparition de la forêt a entraîné une augmentation de l'écoulement, à la fois à l'échelle annuelle mais aussi pendant la saison sèche.

Enfin, il est intéressant de noter que le maximum d'augmentation du rendement en eau a été atteint trois années après traitement, et que cette augmentation s'est ensuite progressivement réduite.

L'étude de bassins versants expérimentaux représente sans aucun doute la meilleure façon d'approcher la question de l'influence de la forêt sur le comportement hydrologique des bassins versants. En 1930, le grand hydrologue français Maurice Pardé écrivait d'ailleurs à ce sujet : « *L'influence hydrologique du boisement est depuis longtemps fort controversée. Par malheur, les discussions, quelquefois passionnées, se font souvent dans le vide, parce que les contradicteurs prennent pour preuve des faits mal observés, sinon inexacts ou susceptibles d'interprétations diverses. Un seul moyen existe de contrôler avec certitude l'influence de la forêt sur le régime des eaux : la mise en comparaison détaillée et scrupuleuse de deux bassins identiques [...] mais l'un boisé et l'autre déboisé.* »

Cette opinion semble n'avoir suscité que très peu d'intérêt en France. En revanche, elle se répand chez les forestiers et les gestionnaires de la ressource en eau aux Etats-Unis, qui vont mettre en œuvre de nombreuses expérimentations sur le modèle de Wagon Wheel Gap entre 1930 et 1970. Nous présentons, dans la section suivante, une synthèse des résultats obtenus sur les bassins versants appariés.

2.3 L'apport des expérimentations utilisant des bassins versants appariés

2.3.1 Rappel des principes de la méthode

Le principe des bassins versants appariés est simple (Cosandey, 1995; Hewlett, 1971; Hewlett, 1982) et reste la référence pour ce qui est des études d'impact de la modification du couvert végétal sur l'hydrologie d'un bassin versant. Il consiste à sélectionner deux bassins versants, aussi semblables que possible (notamment pour ce qui est de leur taille, de leur géologie, de leur climat - pluie et ETP - et de leur occupation des sols). Ce fort degré de similarité mène à penser que les bassins fonctionnent de la même façon. Cependant, il est naturel que chacun ait ses particularités. Pour mettre en évidence particularités et similitudes de comportement entre bassins, il est nécessaire de les suivre simultanément pendant un certain temps. L'idéal serait que cette période préliminaire de suivi soit suffisamment variée au point de vue climatique, pour permettre de caractériser aussi complètement que possible l'hydrologie des bassins (deux bassins pouvant se comporter de façon très semblable en année humide, et diverger plus sensiblement en année sèche).

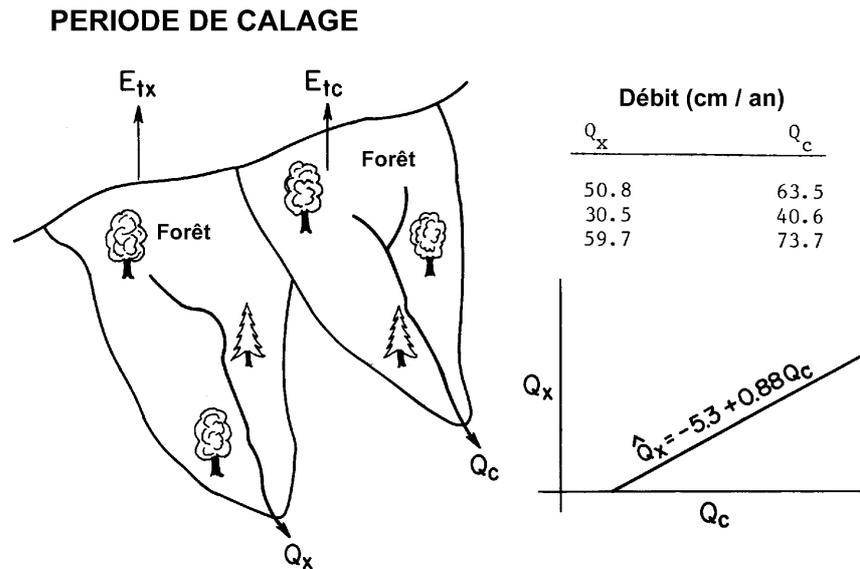


Figure 2.1 : méthode des bassins versants appariés - calage d'une relation entre les bassins au cours de la période précédant le traitement (d'après Hewlett, 1982)

A l'issue de cette période - que l'on appelle *période de calage* - on peut procéder à la manipulation du couvert végétal de l'un des bassins. Ce dernier sera qualifié de « bassin traité », alors que l'autre, que l'on laissera dans son état initial, sera le « bassin de contrôle ». La relation qui a été établie avant traitement entre les débits (ou plus généralement, les comportements hydrologiques) du bassin de contrôle et du bassin traité, sera utilisée pour reconstituer ce qu'aurait été la production du bassin traité sans traitement. Cette reconstitution permettra une évaluation directe de l'impact du traitement sur le comportement hydrologique du bassin considéré.

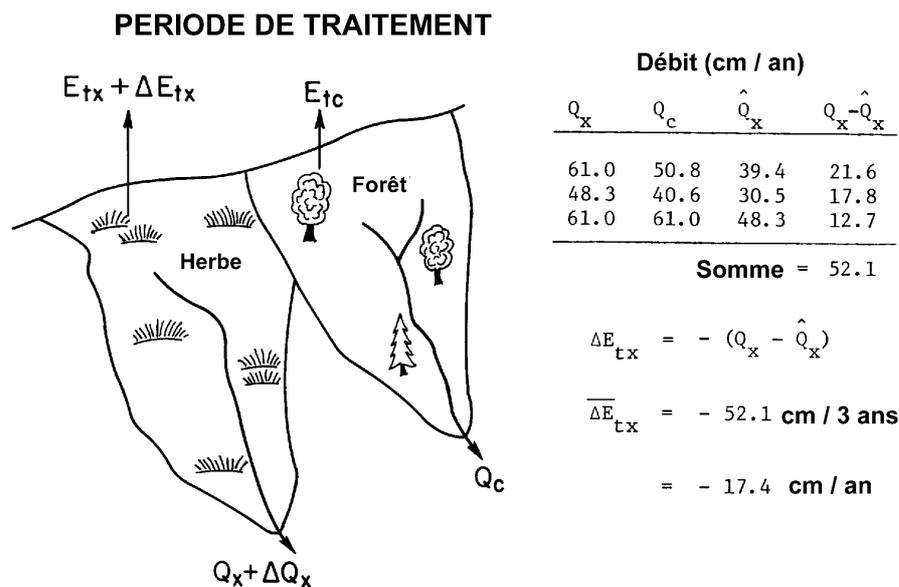


Figure 2.2 : méthode des bassins versants appariés - évaluation de l'effet du traitement grâce à la relation calée avant son application (d'après Hewlett, 1982)

Attardons-nous sur les hypothèses qui doivent être faites pour interpréter ce plan d'expérience :

- avant tout, il faut avoir pu trouver des bassins versants similaires dont la réponse hydrologique soit fortement corrélée. En effet, une faible corrélation rendrait la reconstitution des débits du bassin traité très incertaine, et l'interprétation des résultats plus difficile ;
- il faut également que les bassins versants soient géographiquement proches pour garantir qu'ils sont soumis aux mêmes variations climatiques pendant la période d'étude. Cette condition permet de limiter au maximum le « bruit » dû aux variations climatiques, qui peut également nuire à l'interprétation des résultats ;
- enfin, le bassin de référence se doit de rester stable (stationnaire) pendant l'ensemble de la période d'étude.

Pour ce qui est des avantages de l'approche des bassins versants appariés, il est clair qu'elle permet de s'affranchir des deux problèmes majeurs que sont la variabilité climatique (on peut à tout moment, grâce au bassin de contrôle, reconstituer ce qu'aurait été la réponse du bassin sous les conditions observées) et la variabilité entre bassins (celle-ci a été balisée, autant que cela pouvait se faire, au cours de la période de calage). Une approche qui n'utiliserait qu'un bassin (avant et après traitement), serait difficilement interprétable en raison de la variabilité climatique, et une approche qui comparerait deux bassins (l'un forestier et l'autre pas) serait ininterprétable car les bassins n'auraient pas été étalonnés l'un par rapport à l'autre.

2.3.2 Synthèse des données rassemblées dans la littérature

Etant donné l'intérêt scientifique des expérimentations réalisées sur des bassins versants réels, nous avons choisi de présenter ici une synthèse de leurs résultats, en nous fondant naturellement sur celle proposée par Bosch et Hewlett (1982), que nous avons enrichi de résultats parus depuis la publication de leur article.

La liste des sites utilisés est présentée en Annexe I.2. Nous avons rassemblé¹ au total 113 expériences, dont 94 relatives à l'impact du déboisement sur l'hydrologie des bassins versants et 19 relatives à l'impact du reboisement. La Figure 2.3, la Figure 2.4 et la Figure 2.5 présentent l'essentiel des caractéristiques de l'échantillon.

¹ Nous avons écarté certains bassins de la liste de Bosch et Hewlett, soit lorsqu'il manquait certaines informations, soit lorsqu'un examen des documents originaux a montré que les résultats rapportés par Bosch et Hewlett ne correspondaient pas à une expérimentation de type "bassin versant apparié" (comme c'était le cas par exemple pour les résultats d'Eschner (1966) sur la rivière Sacandaga). Nous n'avons pas pris en compte non plus les bassins que les auteurs présentent au tableau II de leur publication (*climatic uncontrolled catchment experiments*) qui ne correspondent pas à des résultats de bassins versants appariés.

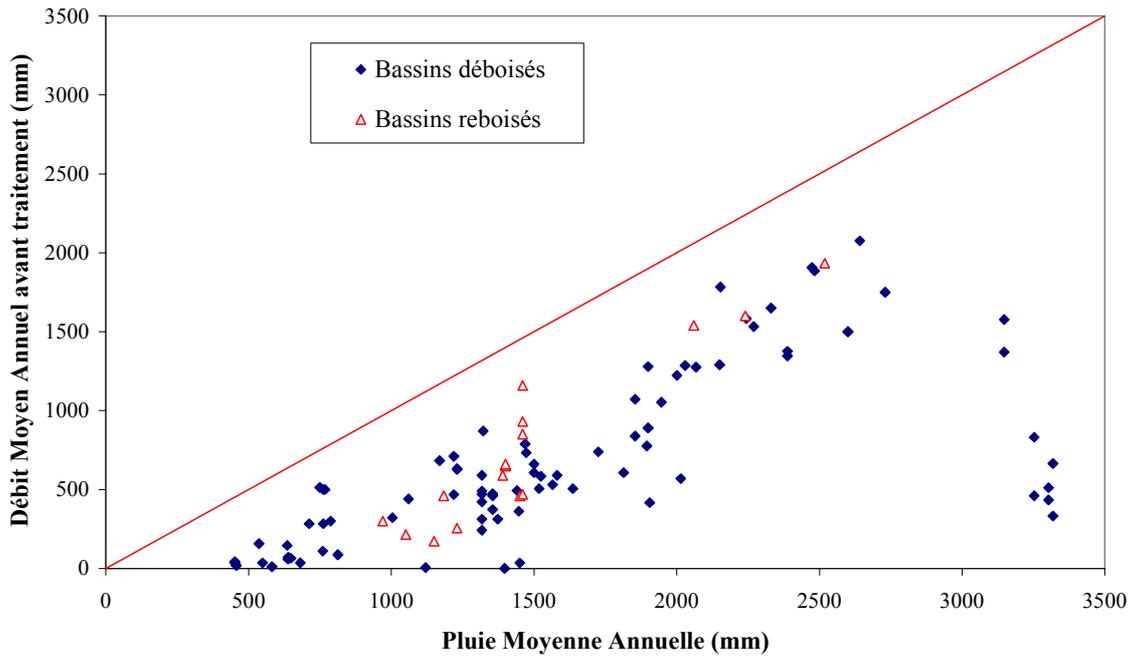


Figure 2.3 : pluie moyenne annuelle et débit moyen annuel (avant traitement) des bassins rassemblés dans la littérature hydrologique

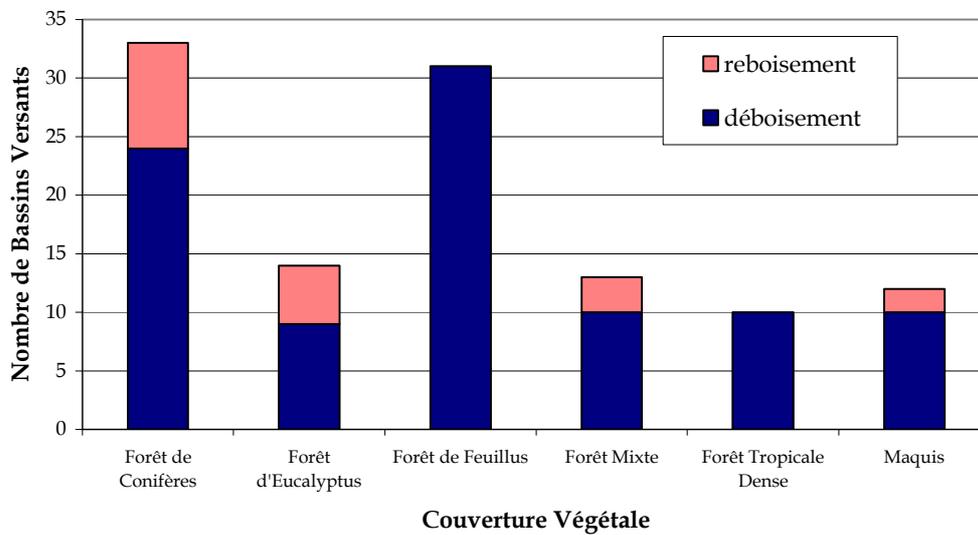


Figure 2.4 : répartition des bassins versants rassemblés dans la littérature selon le type de couverture végétale

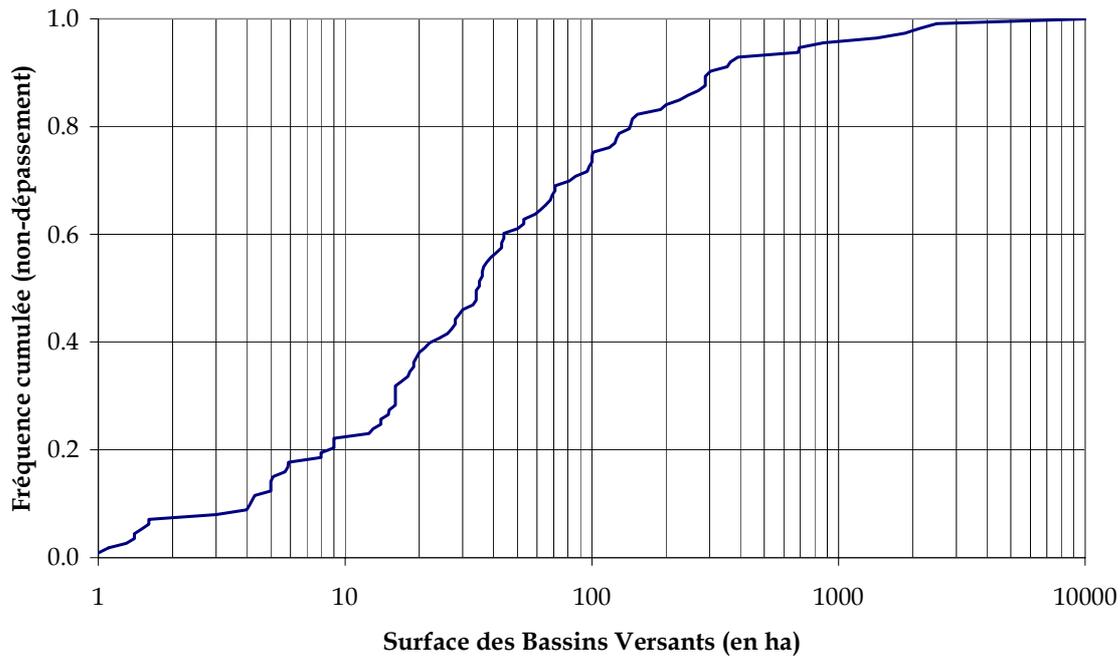


Figure 2.5 : distribution des surfaces des bassins versants rassemblés dans la littérature hydrologique

On peut remarquer en Figure 2.3 et Figure 2.4 que les expérimentations portant sur les effets du reboisement sont nettement moins nombreuses que celles portant sur les effets du déboisement (ce qui se comprend si l'on prend en compte les échelles de temps d'observation nécessaires). La Figure 2.4 montre que tous les grands types de couvert forestier des milieux tempérés sont concernés par les expérimentations, qui se sont concentrées sur de tous petits bassins versants (Figure 2.5) : 80 % des bassins font moins de 1.5 km². A nouveau, c'est compréhensible dans la mesure où les expérimentations de déboisement / reboisement sont très lourdes à mettre en œuvre. Les plus grands des bassins de l'échantillon ne sont d'ailleurs pas réellement des bassins « expérimentaux », il s'agit de bassins du réseau hydrométrique général pour lesquels on a pu trouver un bassin de référence stable et dont on connaît l'évolution du couvert végétal.

En ce qui concerne la nature des résultats présentés dans la littérature, on constate qu'ils portent presque toujours sur la variable écoulement annuel, assez souvent sur les pics de crue, parfois sur les étiages. Quelques auteurs présentent des analyses plus poussées portant sur le régime d'écoulement (caractérisé par une courbe de distribution fréquentielle des débits). Dans les sections suivantes, nous détaillons les enseignements recueillis au moyen des bassins versants appariés sur ces deux sujets.

2.3.3 Forêt et écoulement annuel (rendement en eau du bassin versant)

La façon la plus classique d'interpréter les résultats issus d'expérimentations sur des bassins versants appariés consiste à les présenter sous la forme de la Figure 2.6 et de la Figure 2.7 (Bosch and Hewlett, 1982). Le pourcentage du bassin versant « traité »

(c'est à dire déboisé ou reboisé suivant les cas) y est mis en relation avec la variation du débit moyen annuel constatée à partir du dispositif apparié.

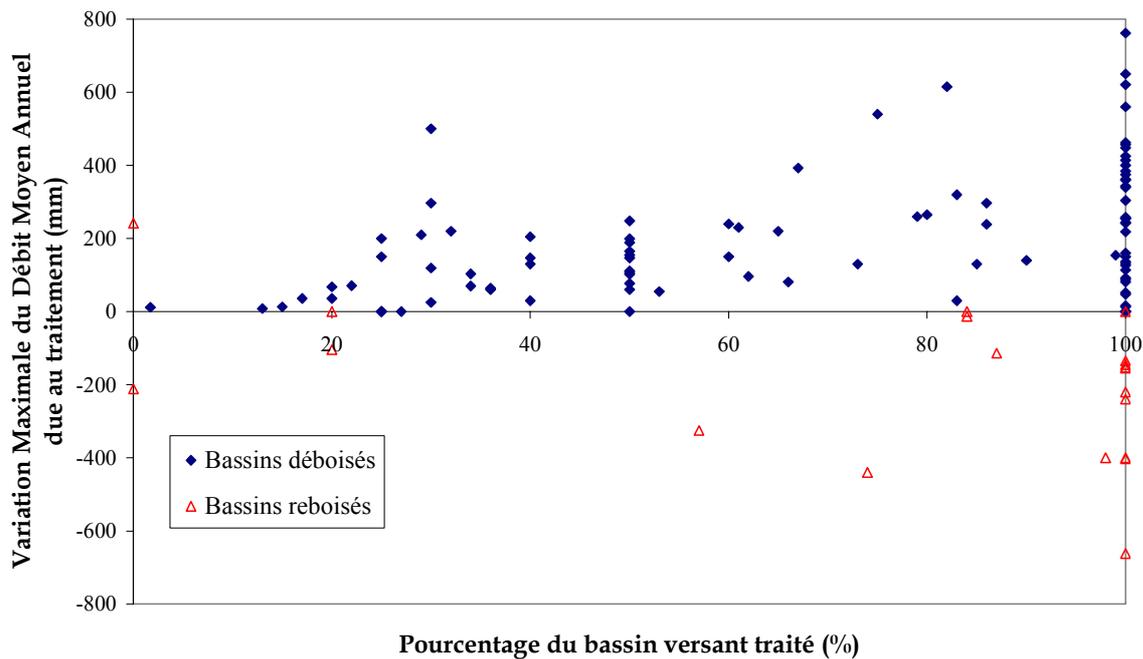


Figure 2.6 : variation maximale du débit annuel (exprimée en lame d'eau équivalente) suite au traitement en fonction de la proportion des bassins versants traités (données issues de la littérature hydrologique)

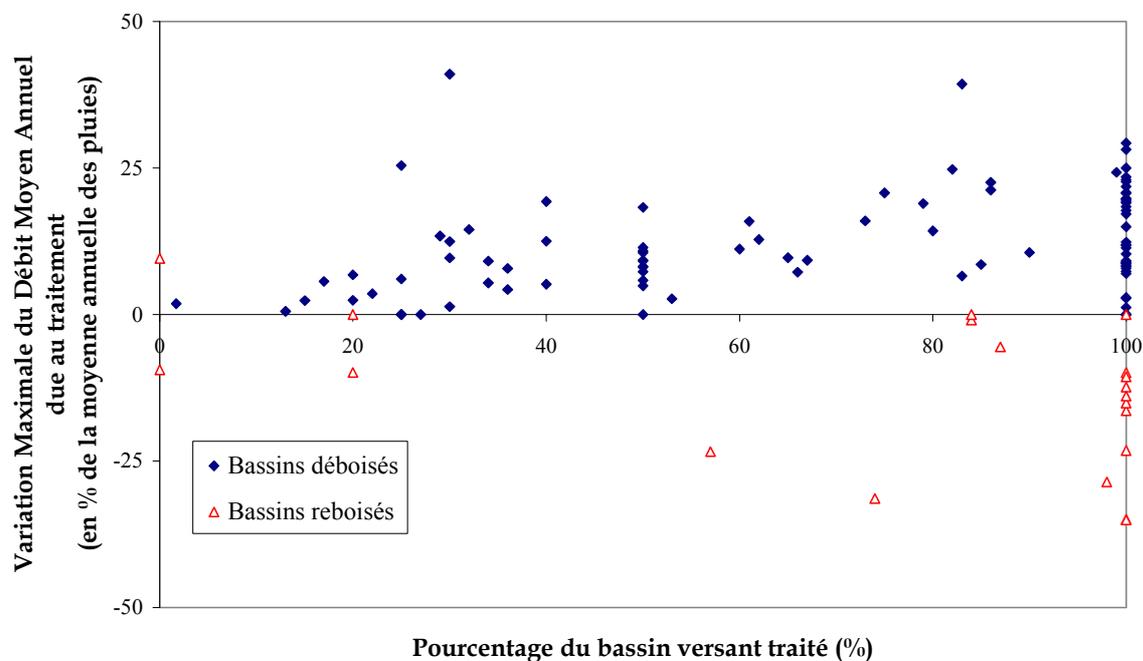


Figure 2.7 : variation maximale du débit annuel (exprimée en pourcentage de la moyenne annuelle des pluies) suite au traitement en fonction de la proportion des bassins versants traités (données issues de la littérature hydrologique)

On y voit ainsi clairement que le déboisement a pour effet d'augmenter le débit moyen annuel, et que le reboisement a pour effet de le diminuer (nous reviendrons plus tard sur le cas un peu particulier de variation du rendement du bassin sans variation du taux de boisement). On y voit également que les résultats sont extrêmement dispersés, ce qui justifie la façon dont Hibbert (1967) synthétisait les résultats connus à son époque :

1. *Reduction of forest cover increases water yield.*
2. *Establishment of forest cover on sparsely vegetated land decreases water yield.*
3. *Response to treatment is highly variable and, for the most part, unpredictable.*

Plusieurs réserves peuvent être formulées concernant le mode de présentation adopté en Figure 2.6, et l'analyse des résultats qui en est faite le plus souvent :

- d'une part, la "variation maximale du débit annuel" est un peu difficile à interpréter pour la raison qu'elle est très dépendante de la pluviosité des années qui suivent le traitement. Nous ne l'avons adoptée que de façon conventionnelle, pour suivre Bosch et Hewlett (1982), et parce que cette donnée était disponible pour toutes les expérimentations. Mais en réalité, il faudrait pouvoir comparer la relation pluie-débit avant et après traitement, comme le suggèrent Hibbert et al. (1975). En effet, si l'on considère, en première approximation, que la relation entre Pluie annuelle (P_a) et Débit annuel (Q_a) est linéaire avant et après traitement, la Figure 2.8 illustre le fait que la variation maximale observée dépendra de la pluviosité des années qui auront suivi le traitement. L'idéal serait donc de caractériser l'évolution du bassin par le rapport des pentes de la relation $P_a - Q_a$.

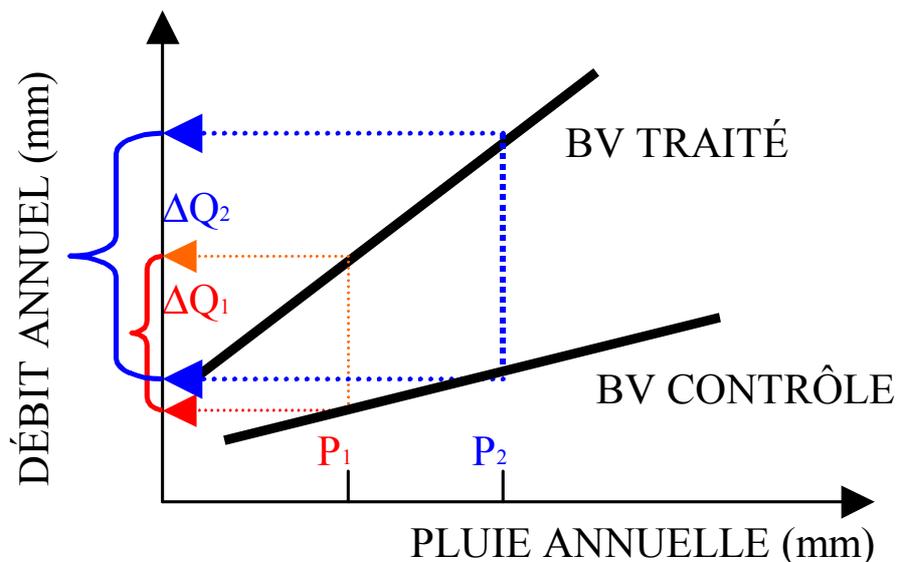
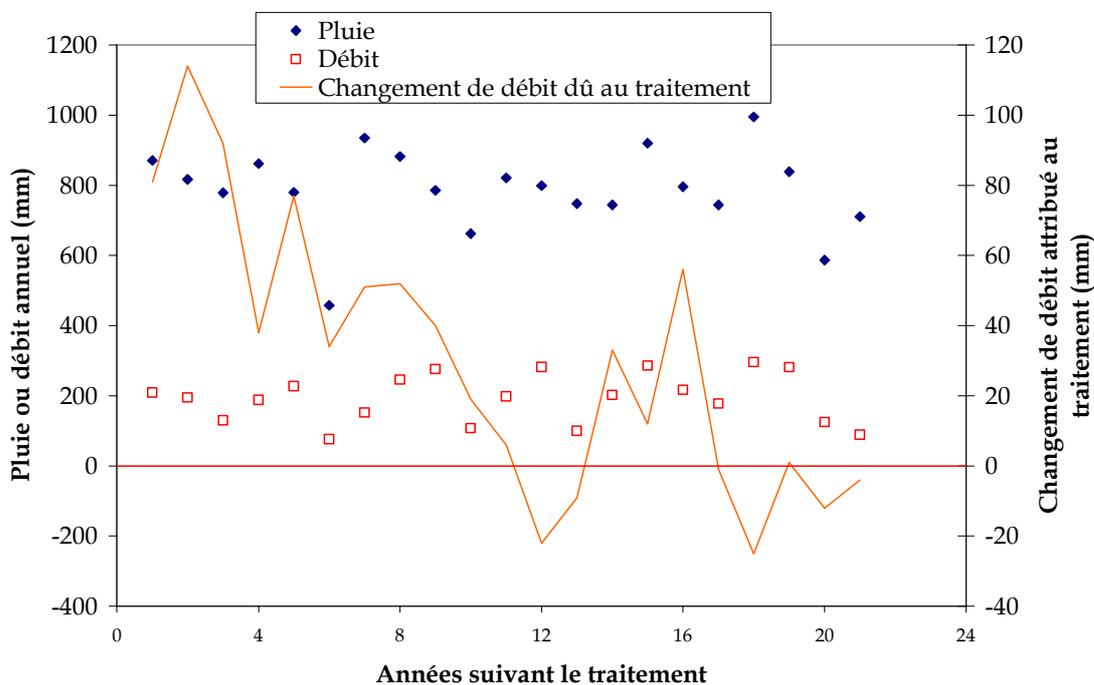


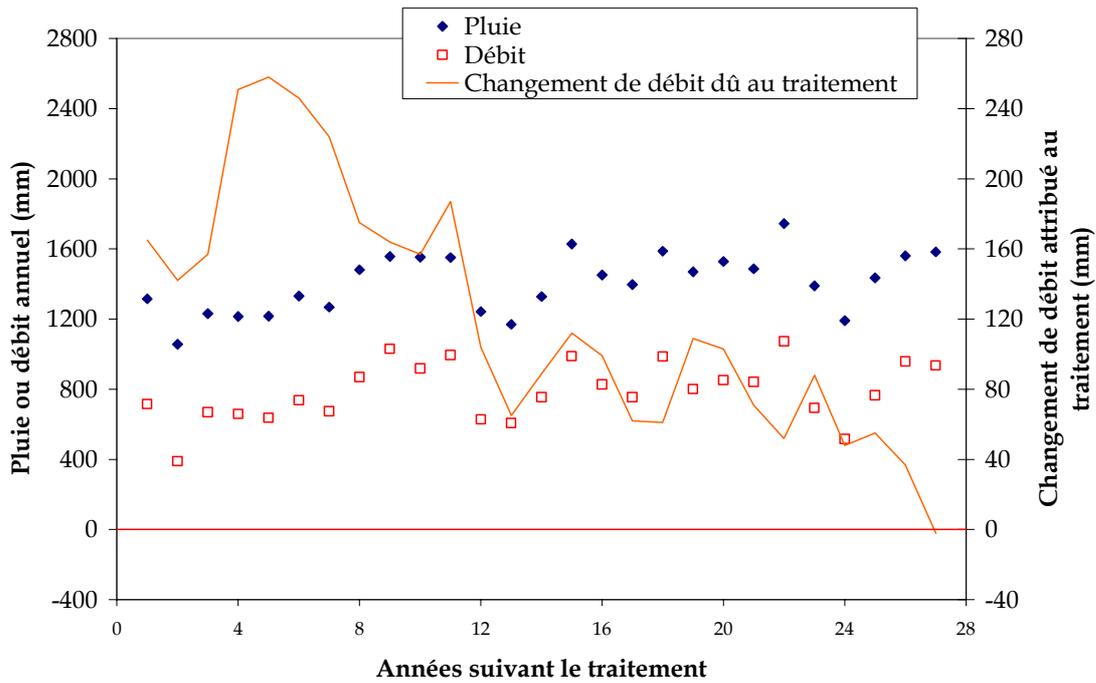
Figure 2.8 : Différentes réponses à la conversion d'un bassin versant forestier en fonction de la pluie de l'année considérée (d'après Hibbert et al., 1975)

Malheureusement, les données publiées dans la littérature sont rarement suffisantes pour construire un graphe tel que celui de la Figure 2.8, et on doit donc se contenter de variations maximales exprimées en mm.

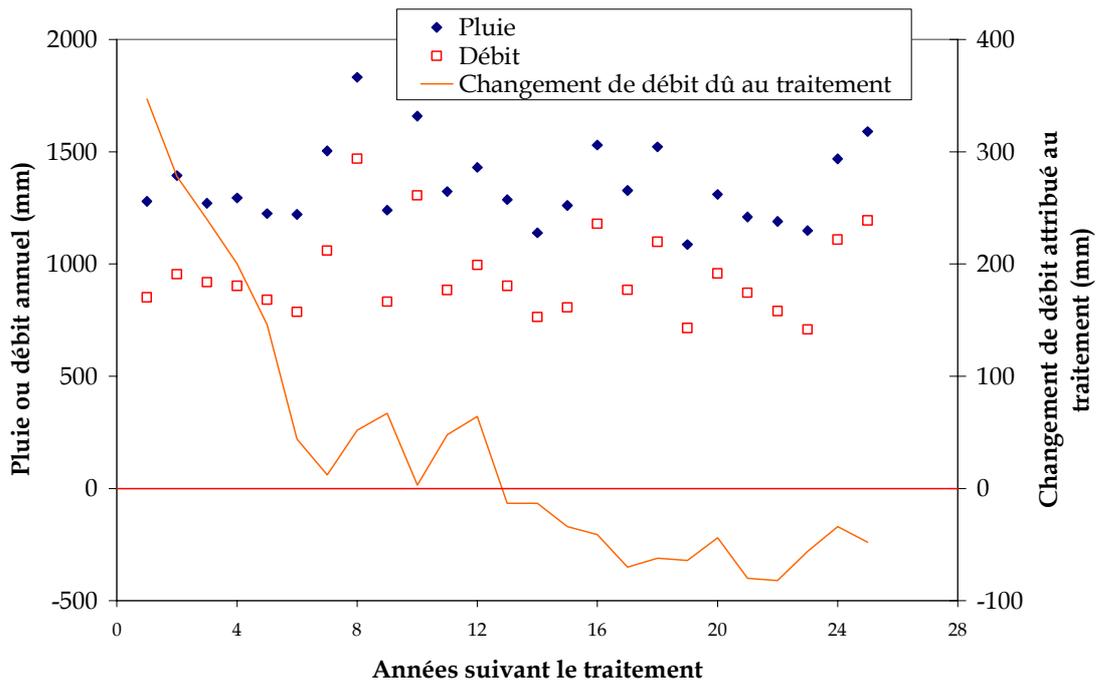
- le second problème qu'il nous faut évoquer ici est celui de la non stationnarité des changements induits par le traitement. Le plus souvent, un bassin déboisé expérimentalement retourne assez rapidement vers un état intermédiaire, de telle sorte que l'on a très peu de temps pour caractériser la relation pluie-débit en l'état déboisé. La Figure 2.9 illustre ce point en présentant pour trois expérimentations qui ont été suivies sur le long terme, les variations de pluie, de débit et de variations de débit imputables au traitement (c'est à dire, calculées à partir du bassin de contrôle).



(a) Marcell Experimental Forest, bassin n°4



(b) Fernow Experimental Forest, bassin n°7



(c) Hubbard Brook Experimental forest, bassin n°2

Figure 2.9: exemples d'évolution du comportement hydrologique des bassins versants après traitement (d'après les données de Hornbeck et al., 1993)

On constate sur les trois exemples ci-dessus qu'il existe un lien entre la variation induite par le traitement (ici, l'augmentation du rendement en eau du bassin) et la pluviosité, mais aussi que la durée d'action du traitement est limitée, et que l'on

retombe à des chiffres proches de zéro après une période comprise entre 7 et 25 ans. Pour le bassin n°2 de l'Hubbard Brook Experimental Forest, on observe même qu'après 13 ans, la vigueur des jeunes arbres qui se sont installés après la coupe rase est telle que le rendement en eau du bassin semble significativement inférieur à ce qu'il était avant traitement. Hornbeck et al. (1997) expliquent cette observation par un changement de composition spécifique, la repousse étant plus riche en espèces à faible résistance stomatique.

Au sujet de la consommation en eau des repousses après traitement, il est intéressant de noter ici que cet aspect de l'hydrologie forestière (a priori mineur dans l'hémisphère Nord) peut se révéler être la préoccupation principale des gestionnaires dans l'hémisphère Sud : en Australie, par exemple, où les forêts d'Eucalyptus regnans (Mountain ash) couvrent les bassins versants d'alimentation en eau de la ville de Melbourne. Les incendies y sont suivis par une légère augmentation de rendement en eau les premières années, puis très vite - après 3 à 5 ans - par une décroissance prononcée de ce rendement, qui atteint un maximum 15 à 20 ans après l'incendie (Kuczera, 1987). La décroissance, qui peut atteindre 300 à 400 mm, s'explique non pas par la disparition de la forêt mature, mais par son remplacement par une forêt jeune très dense et à croissance très rapide.

Toujours en Australie, Cornish (1993) rapporte les résultats d'expérimentations sur bassins versants appariés. Six bassins versants ont été exploités à des degrés divers (de 25 à 80 %). Sur les six années postérieures au traitement, cinq bassins montrent une augmentation significative du rendement en eau (avec un maximum la première ou la deuxième année suivant le traitement). Cette augmentation est suivie d'une diminution significative du rendement dans un cas seulement (à partir de la cinquième année suivant le traitement).

Pour expliquer cette évolution, les chercheurs australiens se sont intéressés aux déterminants physiologiques de la transpiration et du rendement en eau des eucalyptus (Roberts et al., 2001; Vertessy et al., 1995, 1997, 2001), pour mettre en évidence un comportement qui semble caractéristique aux Eucalyptus. Les peuplements de ces derniers connaissent un pic de transpiration vers l'âge de 15 ans, qui s'explique essentiellement par un pic de surface totale en aubier. La Figure 2.10, qui montre l'évolution des composantes du bilan en eau d'un couvert d'Eucalyptus sur le bassin versant de Maroondah en Australie, indique clairement une augmentation de la part disponible pour l'écoulement au cours du temps.

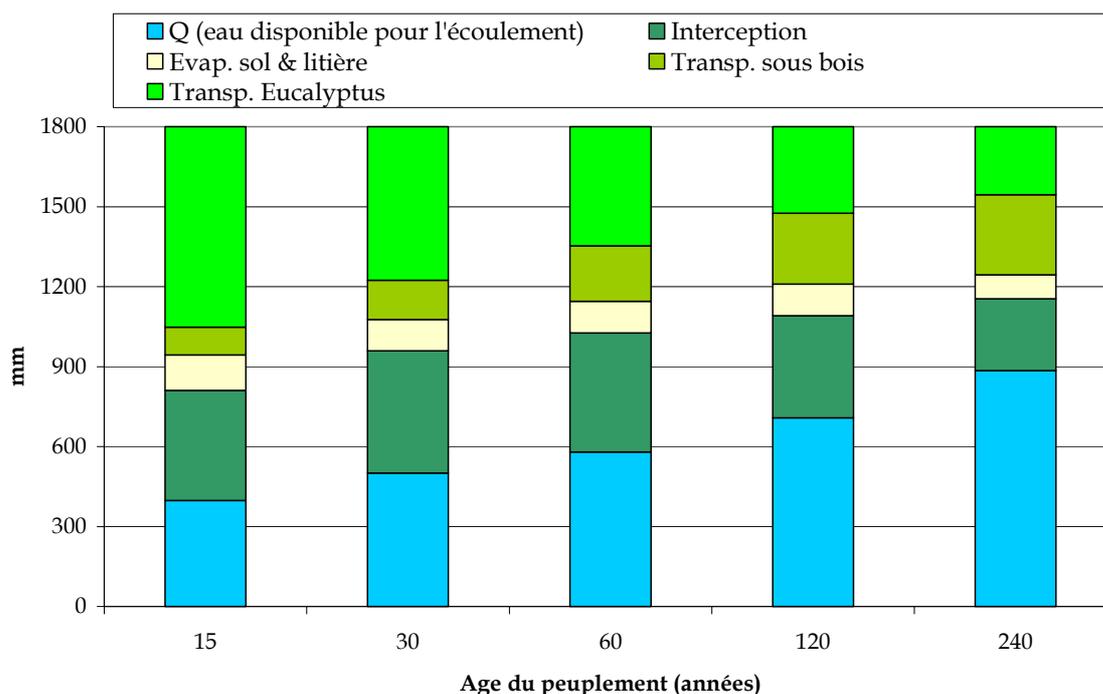


Figure 2.10 : estimation de l'évolution du bilan en eau de peuplements d'*Eucalyptus regnans* dans le BV de Maroondah, Australie pour une pluie moyenne annuelle de 1800 mm (d'après Vertessy et al., 2001)

- La Figure 2.6 pose un dernier problème : celui de bassins reboisés, dont le rendement en eau change alors que la surface boisée n'est pas modifiée. Il s'agit d'un bassin sud-africain, (Langrivier/Jonkershoek) et d'un bassin du pays de Galles (Severn/Plynlimon). Le premier est couvert du maquis caractéristique de la région du cap (fynbos), qui a été protégé contre le feu pendant une période de 20 ans (Van der Zel et Kruger, 1975); le second (Hudson et al., 1997b) est un bassin forestier couvert d'épicéas vieillissants. On observe que dans le premier cas, la protection contre le feu, qui s'accompagne d'une augmentation de la surface terrière et de la biomasse, a pour effet de réduire le rendement en eau du bassin. Dans le second cas, il est plus probable que la surface terrière et la biomasse n'évoluent plus que très lentement, et que cette réduction de la vigueur de la végétation a pour conséquence une augmentation du rendement en eau.

On doit alors s'interroger sur le ou les descripteurs de l'évolution du couvert forestier dont il faudrait pouvoir tenir compte pour mieux décrire la relation entre modification de la forêt et modification du rendement en eau d'un bassin. Il est clair que l'on ne peut se contenter de la surface, et qu'il faudrait au moins pouvoir disposer d'une estimation de la biomasse (telle que la surface terrière¹ ou le volume sur pied, deux paramètres appréciés par les forestiers), et éventuellement d'une estimation de l'accroissement des arbres.

¹ Ces descripteurs forestiers sont présentés et définis au chapitre 7.

2.3.4 Impact sur les crues

L'impact de la forêt sur les pointes de crue était, dès l'expérimentation de Wagon Wheel Gap en 1910, l'un des objectifs majeurs de l'étude. Le Tableau 2.1 présente quelques résultats numériques recueillis dans la littérature, concernant l'impact hydrologique du déboisement. Ce tableau est relativement éloquent par lui-même, mais nécessite un commentaire : il existe une différence d'échelle importante entre les bassins du programme ECEREX¹ de Guyane et les autres, ainsi qu'une nette différence climatique (les bassins ECEREX étant situés en Amazonie, et les autres aux Etats Unis).

Tableau 2.1 : observations sur l'effet du déboisement sur les crues pour des bassins versants appariés

Bassin versant	Surface (ha)	Référence	Surface traitée	Variation du pic de crue	Variation du volume en crue
Wagon Wheel Gap	81	Bates et Henry (1928)	100 %	+50 %	+30 %
Coweeta	44 à 144	Swank et al. (1988)	100 %	+7 à 30 %	
Hubbard Brook	16 à 35	Hornbeck et al., (1997)	100 %	-40 à +63%	
Fool Creek	289	Troendle et King (1985)	40 %	-18 à +108 %, moy. +23 %	-5 à +18 %, moy. +8 %
ECEREX (bassins A, C, D, E, G, H, I, J)	1 à 1.6 ha	Fritsch (1990)	100%	+17% à +166%	+21% à +104%, moy. +57%
Brownie creek	2134	Burton (1997)	25 %	+ 45 %	

Il est intéressant, pour mieux comprendre les limites de la méthode que nous avons utilisée, d'examiner la variabilité des résultats présentés par Troendle et King (1985), qui ont compilé près de 30 années d'observation à Fool Creek, dans les montagnes du Colorado. La Figure 2.11, qui rassemble leurs résultats, montre que la coupe de 40% de la surface forestière s'est traduite par une augmentation du débit annuel, du pic de crue et du volume de crue; elle attire aussi notre attention sur le fait que les deux paramètres de crue semblent nettement plus variables que le paramètre d'écoulement annuel, et que l'impact du traitement devient négatif certaines années (ce qui signifie, pour les cas où cette valeur est significative, que le déboisement a apparemment permis de réduire la pointe de crue ces années là).

¹ ECEREX : ECologie, EXpérimentation, ERosion

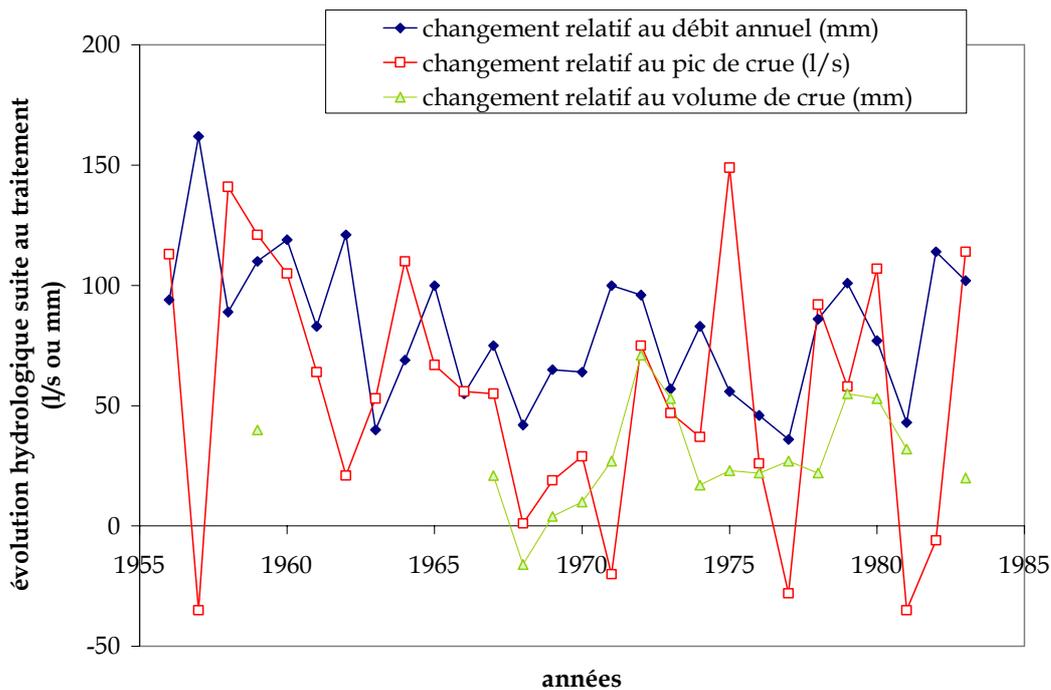


Figure 2.11 : variations annuelles de trois paramètres de l'écoulement en crue suite à la coupe de 40% du bassin versant de Fool Creek (d'après Troendle et King, 1985)

Il est également intéressant de rapporter les commentaires de Fritsch (1990) sur la variabilité des écoulements: « *la variabilité des comportements hydrologiques est du même ordre de grandeur que celle créée par les aménagements* ».

Parmi les nombreuses autres études existantes, on peut retenir les résultats suivants :

- McGuinness et Harrold (1971): pour étudier l'impact du reboisement d'un petit bassin expérimental sur le régime des crues, ils comparent les courbes de distribution fréquentielle des débits; ils montrent ainsi que l'influence du reboisement est très faible, voire inexistante, sur les fréquences rares.
- Hornbeck et al. (1997) ont montré sur le bassin 5 de *Hubbard Brook Experimental Forest*, que l'impact de l'exploitation forestière sur les crues importantes (pic de crue supérieur à 10 mm.jour⁻¹) était différent suivant la saison : pendant la saison de végétation, l'exploitation avait tendance à augmenter ces pics de crue (+15 à +63%), pendant la saison de repos végétatif, l'exploitation avait tendance à les réduire (-2 à -40%). Les auteurs expliquent cette observation par l'origine de l'eau : les pics de crue pendant la saison de repos végétatif sont presque toujours liés à la fonte des neiges. La fonte des neiges commençant plus tôt sur le bassin exploité, la fonte y est plus graduelle et les pics de crue moins importants.
- Cosandey (1993) a étudié l'impact d'une coupe forestière sur le bassin versant expérimental du Mont Lozère. Dans ce contexte climatique particulier, elle a distingué deux types de crue : les « crues cévenoles », faisant suite à de très fortes précipitations (pouvant atteindre plusieurs centaines de mm) et se déroulant

dans un contexte où l'ensemble du bassin est saturé ; les « petites crues », qui se produisent sans que le bassin soit entièrement saturé. Après déboisement, l'auteur n'observe aucun changement de comportement du bassin quant aux crues cévenoles, et attribue aux travaux d'exploitation une légère augmentation des « petites crues ».

- Beschta et al. (2000) ont travaillé sur un échantillon de bassins versants de recherche et de bassins du réseau hydrométrique général. Il ont cherché à identifier l'impact des travaux d'exploitation forestière (coupe et construction de routes). Pour ce qui est de l'interprétation des traitements sur les petits bassins, il apparaît que les opérations de coupe ont pour effet d'augmenter les pics. Cependant, cet effet diminue avec l'augmentation de la période de retour des crues (28% d'augmentation pour une période de retour 0.4 ans, 16% pour 1 an, 9% pour 5 ans). Pour les crues plus rares, ils considèrent que les pourcentages d'augmentation se situent dans le domaine d'incertitude de la mesure de débit et sont donc indétectables. Pour ce qui est des grands bassins (62-640 km²) du réseau hydrométrique général, les incertitudes hydrométriques leur font tout simplement conclure : « *large basin data are seldom likely to be a fruitful means of deciphering potential changes in peak flows associated with forest practices.* »

Pour résumer, on peut dire que les études sur bassins versants appariés ont montré que le déboisement pouvait avoir pour effet d'augmenter à la fois les pics de crue et le volume des crues. Cependant, cet effet est bien plus variable que l'effet du déboisement sur l'écoulement annuel, et peut même s'inverser certaines années.

Inversement, les rares études de reboisement montrent un impact très faible sur les crues, qui devient nul pour les crues les plus rares (c'est à dire les plus importantes).

On peut donc se demander avec Cosandey (1993) si, dans les études de déboisement, l'augmentation observée des crues ne constitue pas l'effet des travaux d'exploitation plutôt que l'effet intrinsèque de la couverture végétale. C'est d'ailleurs ce que Fritsch (1990) conclut également au sujet d'ECEREX : « *à l'échelle des bassins versants étudiés, les causes essentielles de l'augmentation de l'écoulement ne sont pas directement créées par la suppression de l'écosystème végétal forestier, mais par les conditions de cette suppression* ».

2.3.5 Impact sur les étiages

A Coshocton, McGuinness et Harrold (1971) ont montré que la différence en étiage entre leur bassin agricole de référence et leur bassin reboisé avait tendance à s'accroître au cours du temps, ce qui signifie que le boisement a pour effet de réduire les débits d'étiage. Cette observation est confirmée par toutes les expériences de reboisement disponibles dans la littérature, les plus démonstratives étant sans doute celles où le reboisement conduit à l'arrêt total de l'écoulement sur un petit bassin versant, comme dans l'exemple que rapportent Scott et Lesch (1997). Dans cet exemple, on peut également mettre en évidence l'impact du reboisement, dans la mesure où les eucalyptus plantés ont été abattus après seize ans. Le déboisement a eu pour effet de permettre un retour à la normale des débits annuels et des étiages, après une période de transition de cinq ans pendant laquelle les étiages sont restés très faibles.

2.3.6 *Impact sur la répartition temporelle des écoulements*

Les résultats relatifs à l'impact du boisement ou du déboisement sur la répartition temporelle des écoulements concernent soit la période de fonte des neiges, soit la reprise de l'écoulement après l'été :

- **période de fonte des neiges** : à Wagon Wheel Gap (Bates et Henry, 1928) comme à Fool Creek (Troendle et King, 1985), le déboisement a pour conséquence d'avancer la fusion nivale respectivement de 12 et 7.5 jours en moyenne. L'explication avancée par ces auteurs est que la récolte partielle du bois avance la fonte des neiges en zone découverte, et que la plus faible consommation en eau pendant l'été précédent permet de satisfaire plus tôt les besoins de recharge du sol. Mais Burton (1997) pour un bassin versant environ 10 fois plus grand (21 km²) n'observe pas de décalage dans les pointes de crue (ou même parfois un léger retard).
- **reprise d'écoulement** : à Coshocton, McGuinness et Harrold (1971) ont montré qu'en trente ans, le boisement de leur bassin versant expérimental avait eu pour effet de reculer d'un mois la date à laquelle une proportion donnée du débit s'est écoulée, traduisant une nécessité de recharger pendant plus longtemps les sols des zones forestières (qui les avaient au préalable plus exploités).

Hornbeck et al. (1997) ont utilisé des courbes de débits classés pour caractériser l'impact de l'exploitation forestière. L'effet de l'exploitation y est apparent lorsque l'on s'intéresse à l'année entière ou à la saison de végétation. Pendant la saison de repos végétatif, la différence est imperceptible.

2.4 **Synthèse des résultats obtenus sur les bassins versants appariés : impact de la forêt sur le comportement hydrologique d'un bassin versant**

La compilation des résultats de la littérature que nous avons réalisée se fonde sur les résultats de 113 bassins versants appariés que nous avons présentés à la manière de Bosch et Hewlett (1982), ainsi que sur des résultats d'études plus détaillées réalisées sur certains de ces bassins. Cette synthèse nous a permis d'acquiescer la conviction que :

- l'influence de la forêt sur le rendement en eau d'un bassin versant est un fait acquis : la forêt consomme en général plus d'eau qu'un autre type de couvert végétal, de telle sorte que le déboisement a habituellement pour effet d'augmenter la production d'un bassin versant, et le reboisement de la réduire. Cependant, on connaît très mal les conséquences du vieillissement ou tout simplement de la densification d'un peuplement forestier à l'échelle d'un bassin versant. Si un déboisement est toujours suivi d'une augmentation de l'écoulement du bassin versant, la période de recrû qui suit peut selon les cas être caractérisée par une réduction de l'écoulement.

- l'influence de la forêt sur les crues est simple en apparence, dans la mesure où toutes les expérimentations qui font intervenir le déboisement montrent un accroissement des pics de crue. Mais le problème se complique dans la mesure où le reboisement de terres agricoles n'occasionne que de très faibles réductions des crues... En général, il semble que les crues rares sont peu affectées par le boisement ou le reboisement.
- l'influence de la forêt sur les étiages semble également acquise : le reboisement a tendance à réduire les débits d'étiage, et le déboisement à les accroître (dans la mesure où le déboisement ne s'accompagne pas d'une dégradation du sol forestier).
- pour préciser l'influence de la forêt sur l'hydrologie des bassins versants à l'échelle nationale ou régionale, on doit se fonder sur des mesures permettant au minimum l'estimation de la surface terrière. On ne peut probablement pas se contenter d'un seul suivi des surfaces¹ ;
- en raison de la forte variabilité des réponses, il importera d'asseoir notre investigation, pour la suite de ce travail, sur un nombre conséquent de bassins versants.

Si l'impact de la forêt sur le comportement hydrologique d'un bassin versant semble démontré, il reste que selon les bassins versants, selon les conditions climatiques, cet impact ne se manifesterait pas de la même façon. Quelles sont les conditions nécessaires pour que l'influence forestière se manifeste?

- il y a avant tout une **condition pédologique** (Cosandey, 1995; Trimble et al., 1963) : le sol doit être suffisamment profond pour que la forêt puisse avoir un avantage comparatif sur une végétation herbacée quant à la colonisation du sol (un sol trop mince offrira la même réserve utilisable à une forêt et à une prairie). Cette condition pédologique a un corrélaire au plan **climatique** : pour que la forêt puisse utiliser des réserves hydriques profondes, il faut bien entendu que le climat présente en hiver des périodes de surplus hydrologique permettant la reconstitution de ces réserves
- il y a ensuite une **condition climatique** qui, sans être absolue, est très souvent déterminante : le climat doit présenter des périodes de déficit hydrique. Sinon, si le régime des pluies est tel qu'il permet de satisfaire la demande d'évaporation, l'évapotranspiration réelle sera sous la seule dépendance des bilans énergétique et aérodynamique. Cependant, Calder (1990) a montré que la notion même d'évapotranspiration potentielle (vue comme une constante climatique) était fautive, et que la rugosité plus forte de la végétation forestière, sa hauteur, lui

¹ Voir Figure 2.6 : on observe des changements de comportement sans modification des surfaces boisées. Ceci correspond à deux cas de « vieillissement » de peuplements, l'un en Afrique du Sud (Langrivier), où le maquis couvrant le bassin s'est densifié grâce à une protection complète contre le feu (ce qui se traduit par une baisse du rendement en eau), l'autre au Pays de Galles (Severn), où la forêt semble avoir atteint la « maturité » (ce qui se traduit par une augmentation du rendement en eau). Comme l'ont montré Vertessy et al. (2001) en Australie, l'idéal serait sans doute de pouvoir disposer de données sur la surface en aubier et l'indice foliaire des peuplements. Malheureusement, de telles informations n'étaient pas disponibles pour cette étude.

assurait une meilleure utilisation de l'énergie advective et donc un surplus d'interception, notamment en hiver.

2.5 Besoins de recherche

Malgré presque un siècle de recherches en hydrologie forestière, on en est encore trop souvent réduit à citer les conclusions d'Hibbert (1967) qui déplore que la réponse d'un bassin versant à un changement de couverture forestière soit extrêmement variable et, pour sa plus grande part, imprévisible¹.

Si l'on en juge au nombre des publications, la recherche en hydrologie forestière semble désormais se concentrer sur l'étude des processus élémentaires qui interviennent, à l'échelle de la feuille, de l'arbre ou de la petite parcelle forestière, dans le cycle de l'eau en forêt (nous proposons en Annexe I.3 un rapide aperçu de ces processus). Ces études sont intéressantes du point de vue de la recherche fondamentale, et elles sont utiles à l'hydrologue forestier dans la mesure où elles permettent une interprétation qualitative des résultats des bassins versants expérimentaux. Mais nous considérons qu'en l'état actuel de la science hydrologique, les connaissances ainsi acquises ne peuvent être intégrées de façon satisfaisante à l'échelle du bassin versant. Hudson et al. (1997a), comparant les résultats des études de processus avec les résultats observés à l'échelle du bassin versant, notent : « *This range of possible values for forest evaporation [...] is not an indication of deficiencies in either method; it simply illustrates the different interpretation that must be put on results from studies conducted on small, carefully-selected plots subject to considerable internal spatial variability in processes as well as complex catchment integration effects. The conclusion from process studies of forest evaporation conducted within the Plynlimon catchments have generally agreed with the catchment results in direction of change, but invariably the catchment experiment indicates lower rates.* »

Nous croyons donc que seul un travail à l'échelle du bassin versant peut permettre de continuer à avancer dans la connaissance de l'impact de la forêt sur le cycle de l'eau. Et malgré le grand nombre des expérimentations réalisées jusqu'ici, celles-ci présentent les limites suivantes :

- **première limite : la localisation des expérimentations.** Les gestionnaires de la ressource en eau sont demandeurs d'informations concernant l'impact du reboisement dans notre pays, et ils sont très peu réceptifs à des résultats d'expérimentations venant d'autres pays. Or, sur les 113 bassins versants cités en Annexe I.2, seuls deux concernent la France Métropolitaine, et correspondent à

¹ Cette conclusion n'est pas spécifique à l'école hydrologique américaine ou anglo-saxonne. Ainsi, Voskianian et Sarkissian (1995) résument ainsi la vision de l'école hydrologique soviétique : « *En généralisant, il est possible de dire que l'influence de la forêt sur l'hydraulicité d'une rivière dépend d'un certain nombre de facteurs et qu'elle ne peut pas être unique dans toutes les conditions naturelles et dans tous les cas d'activité humaine.* » (Ընդհանրացնելով այս բոլորը, կարելի է ասել, որ անտառի ազդեցությունը գետի ջրայնությունը վրայ կախված է մի շարք գործոններից եւ չի կարող միատեսակ լինել տարբեր բնական պայմանների ու մարդու տարբեր տնտեսական գործունեության դեպքում :)

des cas de déboisement. L'hydrologie restant une science très empirique, il est indispensable de fournir aux utilisateurs des résultats acquis en France;

- **deuxième limite : la taille des bassins expérimentaux.** Les gestionnaires (et les hydrologues en général) n'aiment pas non plus généraliser les résultats à une échelle très différente de leur échelle de travail, tant les effets d'échelle restent importants en hydrologie. Or les bassins expérimentaux sont toujours très petits (de l'ordre du km² au plus, voir Figure 2.5), et un bassin utilisé pour l'alimentation en eau d'une agglomération fait généralement au moins quelques dizaines de km² : c'est à cette seconde échelle que des résultats sont nécessaires pour venir en aide aux gestionnaires;
- **troisième limite : la nature de l'évolution du couvert forestier.** Cette limite tient au fait que la plupart des recherches ont traité de l'influence de la coupe à blanc et non pas du reboisement (Figure 2.3). Quand même il s'agit de reboisements, ces derniers sont massifs, concernent une part importante de la superficie du bassin versant. Or, cela ne correspond pas du tout au phénomène actuellement à l'œuvre en France (notamment dans le Massif central) où, si l'accroissement du couvert forestier est réel, il est extrêmement diffus. De plus, la forêt s'accroît non seulement par augmentation des surfaces qu'elle occupe, mais aussi par densification (vieillessement) des peuplements plantés après la seconde guerre mondiale. A ce sujet, certains auteurs ont utilisé de façon équivalente la surface totale et la surface terrière pour décrire l'accroissement du couvert forestier et le lier aux changements hydrologiques (voir par exemple Eschner et Satterlund, 1966). Cependant, on ne sait pas dire systématiquement quelle conséquence hydrologique aura la maturation d'un peuplement forestier.

Dans ces conditions, il nous a semblé qu'une contribution utile consisterait à travailler sur la question de l'accroissement du couvert forestier dans le Massif central, en utilisant des données du réseau hydrométrique général (des bassins suffisamment nombreux et assez grands), et en travaillant à caractériser non seulement l'évolution des surfaces forestières, mais aussi celle de la densité du couvert.

La Partie II est consacrée à la présentation des bassins versants que nous avons étudiés et à la méthodologie adoptée pour étudier les tendances du comportement hydrologique des bassins versants.

CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE

La vivacité des controverses actuelles sur le rôle hydrologique de la forêt s'explique bien par l'ancienneté du débat, que l'on peut faire remonter jusqu'à Pline l'ancien, et par la profonde polémique qui a opposé les ingénieurs de Ponts et Chaussées aux officiers des Eaux et Forêts au 19^{ème} siècle. Pour éclaircir la question, des comparaisons de bassins versants ont été initiées par l'ingénieur Belgrand et par les forestiers Jeandel, Cantégril et Bellaud. Si la faiblesse des moyens financiers et techniques disponibles à l'époque ne leur a pas permis de conclure, la voie qui avait été tracée permettait d'envisager de nombreux développements, qui n'ont malheureusement pas eu lieu en France, mais aux Etats-Unis où, à partir de 1910, des expérimentations basées sur le principe des bassins versants appariés ont vu le jour.

La compilation des résultats obtenus sur des bassins versants appariés montre bien que l'influence de la forêt sur le rendement en eau d'un bassin versant est un fait acquis : la forêt consomme plus d'eau qu'un autre type de couvert végétal. L'influence de la forêt sur les crues n'est simple qu'en apparence : si les déboisements expérimentaux entraînent un accroissement des pics de crue, le reboisement de terres agricoles n'occasionne que de très faibles réductions des crues. En général, il semble que les crues rares sont peu affectées par le boisement ou le reboisement.

Constatant le très petit nombre de références françaises, et examinant les limites des résultats présentés dans la littérature, nous avons identifié un besoin de recherche supplémentaire, concernant l'impact du reboisement lent et de la densification des espaces forestiers, qui est observée dans le Massif central depuis la fin de la seconde guerre mondiale. La recherche devra concerner des bassins versants suffisamment grands pour être intéressants du point de vue d'un gestionnaire.

Partie II - Comment identifier les modifications du comportement hydrologique liées à l'évolution du couvert forestier ?

L'objectif de cette seconde partie est de présenter la démarche et les outils que nous avons choisis pour aborder le problème de l'évolution du comportement hydrologique d'un bassin versant et de son lien éventuel avec un changement d'occupation des sols.

Au chapitre 3, nous présentons les raisons qui nous ont mené à choisir le Massif central comme zone d'étude, la façon dont l'échantillon de bassins versants a été constitué, et la base de données hydro-météorologiques disponible.

Au chapitre 4, nous abordons la question de l'identification du comportement d'un bassin versant, nous discutons des outils (modèles) disponibles pour cette identification, et présentons les raisons qui nous ont mené à retenir le modèle GR4J.

3 CONSTITUTION D'UN ECHANTILLON DE BASSINS VERSANTS

3.1 Le Massif central, zone d'étude privilégiée

A la fin du chapitre 2, nous avons identifié un certain nombre de manques dans notre connaissance des relations entre la forêt et le cycle de l'eau : les références françaises à ce sujet sont très peu nombreuses ; les bassins expérimentaux qui servent de référence aux connaissances actuelles sont tous de petite taille (leur surface restant presque toujours inférieure à quelques km²) ; et enfin, les études relatives au reboisement sont rares, alors même que c'est le phénomène à l'œuvre aujourd'hui en France comme dans de nombreux pays développés, et que cette extension des forêts partout où l'agriculture devient marginale bénéficie d'un fort soutien de la puissance publique.

Pour traiter ces trois points, le Massif central est apparu comme une zone d'étude privilégiée. En examinant d'une part les cartes présentées en Figure 3.1 et Figure 3.2, on peut remarquer que la région est traditionnellement forestière et que l'accroissement actuel du volume sur pied (que nous utilisons ici comme un indice de densité du peuplement) y est fort.

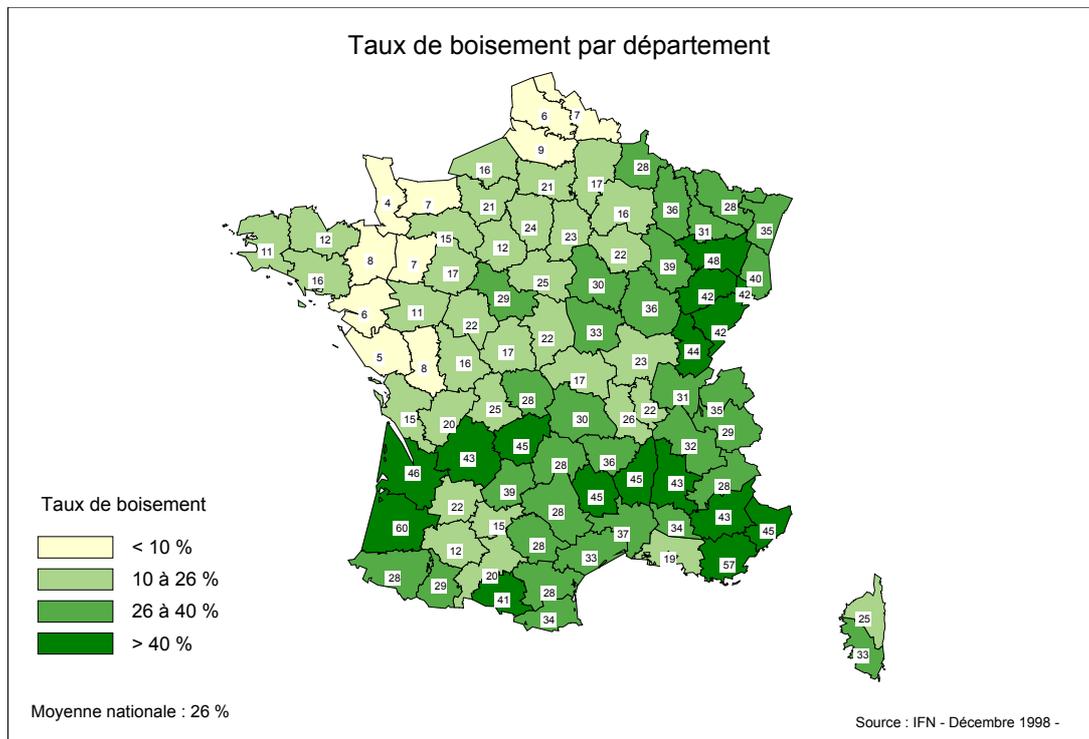


Figure 3.1 : Taux de boisement par département en 1998 (Source : IFN)

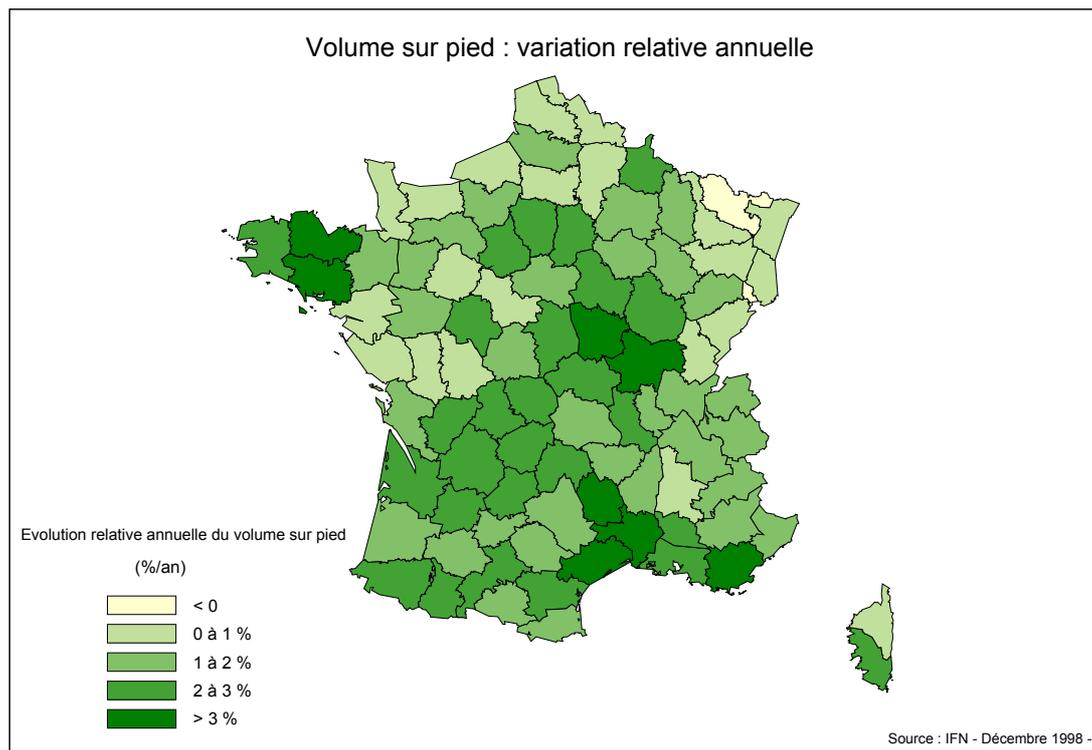


Figure 3.2 : Evolution de la densité et de l'étendue des peuplements, vue sous l'angle du volume sur pied (Source : IFN)

De plus :

- le Massif central est une région où l'agriculture est en recul depuis plusieurs décennies (du fait de sa moindre rentabilité) et dont le taux de boisement n'a fait que croître depuis 1945 (Le Bloas, 1994) ;
- par rapport aux autres massifs montagneux français (Pyrénées et Alpes), le Massif central est moins soumis à l'influence de la neige (qui est à la fois difficile à mesurer sur le terrain et complexe à représenter dans les modèles précipitation-débit) ;
- le Massif central est une région où l'hydrométrie a une histoire ancienne, en lien avec les développements de la production hydroélectrique : on peut donc y trouver des séries hydrologiques d'assez longue durée ;
- enfin, en ce qui concerne les enjeux de protection et de conservation de la ressource en eau, le Massif central est un château d'eau qui alimente à la fois la Loire, le Rhône, la Dordogne, le Tarn et un grand nombre de petits fleuves côtiers méditerranéens, dans une région où la tension sur les ressources en eau est déjà assez importante.

Nous avons discuté au chapitre 2 des possibilités offertes par l'approche des bassins versants appariés. Un premier inventaire a montré qu'il n'y avait pas dans le Massif central, de bassins reproduisant « par hasard » ce dispositif. Nous avons donc dû nous résoudre à utiliser une autre méthode d'analyse, qui sera détaillée au chapitre 9.

Dans ce chapitre, nous nous contenterons de présenter l'approche utilisée pour sélectionner un échantillon d'étude dans le Massif central.

3.2 Echantillon d'étude

3.2.1 Critères de choix de l'échantillon

La constitution de notre échantillon d'étude s'est faite en deux temps :

- dans un premier temps, nous avons choisi de sélectionner dans le catalogue de la banque HYDRO du ministère de l'Environnement, l'ensemble des bassins versants du Massif central¹ d'une surface inférieure à 50 km² et disposant d'au moins 15 années de données en 1996. La limite à 50 km² avait été choisie en raison de la lourdeur du travail d'interprétation des données forestières (existantes uniquement sous forme de photographies aériennes). Les bassins correspondant à ce critère de choix ont été numérotés de 1 à 49 ;
- dans un second temps, nous avons souhaité étendre un peu notre échantillon. Nous avons augmenté la limite de taille qui est passée à 100 km², mais en se limitant à des bassins disposant d'au moins 30 années de chronique de débit². Les bassins choisis selon ce critère ont été numérotés de A à V (22 bassins).

L'échantillon initial choisi comptait donc 71 bassins versants, choisis uniquement sur des critères de taille et de durée de chroniques hydrologiques disponibles, de telle sorte que l'on peut affirmer avoir évité tout biais lié au couvert forestier et au mode de fonctionnement du bassin³.

3.2.2 Critique de l'échantillon : réduction à 63 bassins versants

Au cours de l'avancée de la thèse, nous avons procédé à une critique de l'échantillon, sur la base :

- de l'**examen des cartes IGN au 1 :25000** de chaque bassin versant. Cet examen visuel, au cours duquel nous avons tracé les limites des bassins versants, a permis d'attirer notre attention sur des dérivations (bassin K) ou sur la construction de retenues (bassin 42) ;
- d'un **courrier que nous avons envoyé aux gestionnaires des stations de jaugeage**, par lequel nous présentions notre recherche et nous sollicitons des informations sur les stations de jaugeage ;
- de **contacts téléphoniques** que nous avons eu avec certains gestionnaires, pour obtenir des renseignements complémentaires sur les stations de jaugeage ;

¹ Pour la définition géographique du Massif central, nous avons adopté les limites de la DATAR (Le Bloas, 1994).

² Nous craignons qu'en raison de la lenteur de la croissance de la forêt, il soit très difficile de détecter des tendances avec seulement 15 ans. De plus, 30 années correspondent approximativement à l'ancienneté des données disponibles à l'Inventaire Forestier National.

³ Même si rétrospectivement nous aurions préféré avoir utilisé un critère unique de choix des bassins, cela n'enlève rien à l'impartialité hydrologique de la sélection de l'échantillon.

Partie II – Comment identifier les modifications du comportement hydrologique ?

- d'une **visite sur le terrain pour chacun des bassins**, au cours de laquelle nous avons pu i) vérifier que le positionnement sur la carte de la station de jaugeage et les limites du bassin versant étaient corrects, ii) estimer très grossièrement la qualité relative des données en hautes et basses eaux, iii) observer des ouvrages de retenue qui n'étaient pas portés sur les cartes (bassin E), iv) observer des ouvrages de dérivation que nous n'avions pas remarqués sur les cartes (bassin 4) et v) obtenir toutes sortes de renseignements qualitatifs¹ en discutant avec les riverains des stations de jaugeage et les habitants du bassin versant;
- d'un examen visuel de chaque fichier de débit, au cours duquel on s'est attaché à identifier les longues périodes de lacune et les anomalies simples à détecter (débits constants par exemple).

Ce travail de critique a été mené de façon identique pour chaque bassin, de manière à ne pas introduire de biais méthodologique dans la composition de l'échantillon. A l'issue de la critique, huit bassins ont été écartés, pour les raisons suivantes :

- *bassin 2* : très petit bassin avec des prélèvements importants (captage d'eau potable) à l'amont de la station signalés sur la carte et par le gestionnaire ;
- *bassin 4* : transfert inter-bassin important (appelé par les riverains « les eaux de la ville de Montbrison ») ;
- *bassin 11* : des anomalies évidentes dans le fichier des débits ;
- *bassin 13* : il s'agit d'une source, dont le bassin versant est incertain ;
- *bassin 15* : la chronique de débits disponible s'est avérée être inférieure à 15 ans ;
- *bassin 16* : un dysfonctionnement récurrent des appareils de mesure est signalé, la chronique de débits s'avère être plus courte que 15 ans ;
- *bassin 42* : la chronique de débits disponible avant construction du barrage s'est avérée être inférieure à 15 ans ;
- *bassin 44* : l'apport karstique est en proportion très importante dans ce petit bassin versant (dont la surface et l'occupation du sol sont donc très incertaines).

Notons que nous n'avons pas écarté le bassin 45 (la Cesse), qui bénéficie d'un apport karstique (source vauclusienne : bassin 44), dans la mesure où cet apport n'était pas prédominant. Nous avons pu obtenir les données d'apport du transfert inter-bassin affectant le bassin K (la Truyère à Serverette), de telle sorte que celui-ci n'a pas dû être écarté. Pour le bassin E (le Couzon au Salet), notre analyse ne porte que sur la période précédant la mise en service du barrage, qui reste de longueur acceptable selon nos critères.

3.2.3 *Sous-ensemble de 34 bassins versants dont on connaît l'évolution du couvert forestier*

Il n'est pas encore nécessaire de quantifier l'évolution du couvert forestier dans cette partie de la thèse, et les analyses de tendances concernent l'ensemble des 63 bassins

¹ Toute cette information qualitative a été archivée au Cemagref.

versants. Au chapitre 11, où l'on confrontera tendances hydrologiques et tendances forestières, on se limitera à un sous-ensemble de 34 bassins versants, pour lesquels il a été possible, pendant la durée de cette thèse, de traiter ou de faire traiter les données photographiques (voir chapitre 7).

Dans ce qui suit, lorsque nous présentons les caractéristiques de l'échantillon complet d'étude, nous présentons également les caractéristiques du sous-ensemble de 34 bassins, de manière à vérifier qu'il n'y a pas de biais sensible dans le choix des bassins.

3.2.4 Présentation de l'échantillon d'étude

Les 63 bassins qui ont passé la phase de critique sont présentés au Tableau 3.1, et une carte les situe en Figure 3.3. On y voit que les bassins sont répartis sur l'ensemble du Massif central, mais qu'il existe des groupes de bassins contigus, sur les principaux massifs montagneux (mont Aigoual, mont Lozère, monts du Forez, bordure de l'Aubrac, monts de la Margeride, plateau de Millevaches).

Tableau 3.1 : Liste des 63 bassins versants de l'échantillon d'étude complet (les 34 bassins versants pour lesquels des données d'évolution forestière existent sont notés par une *)

N°	Données d'évolution du couvert forestier	Code Station	Nom de la station	Taille du bassin (km ²)	Département	Première année	Dernière année	Période couverte	Nombre d'années disponibles
1		K0568310	Ecotay à Marllhes (L')	5.2	42	1978	1996	19	18
3		K0724510	Chanasson à la Rivière (Le)	12.7	42	1972	1996	25	24
5		K1004510	Rhodon à Perreux (Le)	32	42	1973	1996	24	23
6		K1084010	Teyssonne à la Noaillerie (La)	23	42	1971	1996	26	25
7	*	K2010810	Allier à Rogleton (L')	48.8	7	1976	1995	20	19
8	*	K2134010	Clamouze à Chastanier	50.5	48	1948	1996	49	32
9		K2365510	Lidenne à Couteuges	46.2	43	1969	1996	28	25
10		K2506010	Lagnon à Murat (Le)	20.7	15	1965	1982	18	17
12	*	L0614010	Aurence à Moulin Pinard (L')	35.1	87	1965	1995	31	30
14	*	L5014110	Graulade à la Vilatte (La)	18.5	23	1975	1994	20	19
17	*	O3006710	Goudech à la Cépède (La)	10	48	1949	1996	48	36
18	*	O3015520	Rieumalet à Pont de Montvert (Le)	20	48	1949	1996	48	36
19	*	O3026210	Mirals à Rhunes	11.7	48	1949	1974	26	15
20	*	O3035210	Briançon à Cocurès 2 (Le)	25	48	1949	1996	48	35

Partie II – Comment identifier les modifications du comportement hydrologique ?

N°	Données d'évolution du couvert forestier	Code Station	Nom de la station	Taille du bassin (km ²)	Département	Première année	Dernière année	Période couverte	Nombre d'années disponibles
21	*	O3165010	Brèze à Meyrueis (La)	36.1	48	1970	1996	27	26
22	*	O3314010	Dourbie au Mazet (La)	42.9	48	1960	1996	37	35
23	*	O4102510	Agout à Fraisse (L')	48	34	1951	1995	45	32
24	*	O7015810	Esclancide aux Salces (L')	31	48	1978	1996	19	17
25	*	O7404010	Bes à Marchastel (Le)	30.5	48	1960	1996	37	26
26	*	O7625210	Ondes aux Ondes (L')	37	12	1961	1980	20	20
27		P0115010	Burande à la Tour d'Auvergne (La)	20.4	63	1944	1996	53	36
28		P0212510	Rhue à Egliseneuve d'Entraignes (La)	40	63	1956	1996	41	36
29		P3001010	Vézère à Maisonnial (La)	52	19	1957	1996	40	36
30		P3015410	Ars à Ars (L')	33	19	1956	1996	41	37
31	*	P3245010	Mayne à St Cyr (Le)	49	19	1968	1996	29	27
32		P3614010	Montane à Pont du Jay (La)	43	19	1957	1996	40	37
33		U3205210	Grosne aux Chambosses	31	69	1969	1996	28	27
34		V3015010	Yzeron à Craponne (L')	48	69	1969	1996	28	27
35		V3115010	Dorlay à La Terrasse-sur-Dorlay (Le)	17	42	1969	1995	27	27
36		V3315010	Valencize à Chavanay (La)	36	42	1978	1996	19	18
37		V3515610	Ruisseau des Préaux à Bourg-Argental	22.1	42	1978	1995	18	18
38	*	V5406020	Homol à Davaladou (L')	31.2	30	1960	1986	27	12
39	*	V7104010	Gardon de Saint Martin à la Roquette (Le)	31	48	1981	1996	16	14
40	*	V7105210	Gardon de Saint Germain à la Bastide (Le)	31	48	1981	1996	16	15
41	*	V7115010	Gardon de Sainte Croix à Gabriac (Pont Ravagers) (Le)	33	48	1955	1996	42	39
43	*	Y1445010	Ognon à Pépieux (L')	47.1	11	1979	1996	18	17
45	*	Y1605030	Cesse à Cantinergues	47	34	1969	1983	15	14
46	*	Y2002010	Hérault à Valleraugue (L')	46.2	30	1960	1983	24	24
47	*	V7155020	Gardon d'Alès à la Farelle (Le)	30	48	1953	1975	23	22
48	*	V4025010	Embroye à Toulaud (L')	7.4	7	1981	1996	16	16
49		U4515420	Vauxonne à St-Etienne des Oullières (Buyon) (La)	49.3	69	1981	1996	16	16
A	*	K2064010	Langouyrou à Langogne (Le)	65	48	1954	1996	43	42
B		K0733220	Lignon de Chamazel à Chevelières (Le)	60.5	42	1949	1996	48	45

Chapitre 3 : Constitution d'un échantillon de bassins versants

N°	Données d'évolution du couvert forestier	Code Station	Nom de la station	Taille du bassin (km ²)	Département	Première année	Dernière année	Période couverte	Nombre d'années disponibles
C		K2834010	Dolore à Moulin Neuf (Mayres) (La)	70	63	1965	1996	32	30
D		K2884010	Faye à Giroux (Augerolles) (La)	72	63	1965	1996	32	31
E		K2944010	Couzon au Salet (Courpières) (Le)	74.5	63	1965	1996	32	30
F		L0010610	Vienne à Servières (La)	58.5	19	1957	1996	40	40
G	*	O3011010	Tarn à Fontchalettes (Le)	67	48	1948	1996	49	36
H	*	O5344010	Vioulou à Trebon-bas (Le)	57	12	1960	1995	36	34
I	*	O7054010	Colagne à Ganivet (La)	89	48	1962	1995	34	32
J	*	O7145220	Boralde de Saint-Chely à Castelnau de Mandailles (La)	53	12	1961	1996	36	35
K		O7202510	Truyère à Serverette (La)	72	48	1951	1996	46	35
L		P0010010	Dordogne à Saint-Sauves (La)	87	63	1929	1996	68	67
M		P0115020	Burande à Singles (La)	80	63	1960	1995	36	34
N		P0804010	Sumène à Cheyranges	53	15	1957	1996	40	36
O	*	P0924010	Triouzoune à Saint Angel (La)	79	19	1961	1996	36	32
P	*	P1114010	Luzège à Pont de Maussac (La)	84.9	19	1951	1994	44	43
Q		P1712910	Cère à Comblat le Pont (La)	88	15	1959	1996	38	36
R		P3322510	Corrèze à Pont de Lanour (La)	54	19	1948	1996	49	43
S	*	V4145210	Glueyre à Tisoneche (La)	71	7	1953	1996	44	43
T	*	V5425210	Gagnière à Banne (La)	55.3	7	1964	1996	33	32
U		K3374710	Boublon Lagées à Fourilles (Le)	71.4	3	1967	1996	30	30
V	*	K2163110	Grandrieu à Grandrieu (Le)	72.5	48	1944	1996	53	46

Localisation des bassins versants et données disponibles

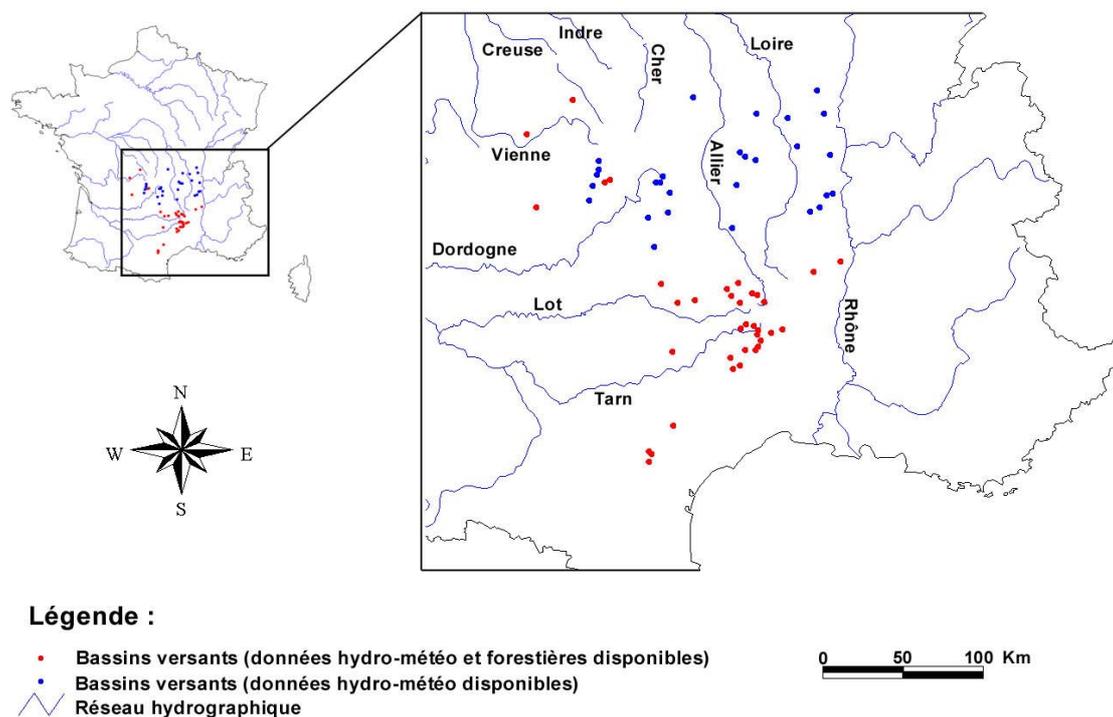


Figure 3.3 : Localisation des bassins étudiés

Le Tableau 3.2 présente la distribution des bassins versants par département.

Tableau 3.2 : distribution des bassins versants de l'échantillon par département

Nombre de bassins versants	Allier	Ardèche	Aude	Aveyron	Cantal	Corrèze	Creuse	Gard	Hérault	Loire	Haute-Loire	Lozère	Puy-de-Dôme	Rhône	Haute-Vienne
	03	07	11	12	15	19	23	30	34	42	43	48	63	69	87
échantillon complet (63 bv)	1	4	1	3	3	8	1	2	2	8	1	18	7	3	1
sous-échantillon (34 bv)	0	4	1	3	0	3	1	2	2	0	0	17	0	0	1

Le Tableau 3.3 présente la distribution des bassins de l'échantillon selon le bassin hydrographique (au sens de l'Agence de l'Eau) auquel ils appartiennent.

Tableau 3.3 : distribution des bassins versants de l'échantillon par Agence de l'Eau

Nombre de bassins versants...	Bassin Hydrographique			
	Loire Bretagne	Adour Garonne	Rhône	Méditerranée
			Total	Corse <i>dont petits fleuves côtiers</i>
... dans l'échantillon complet (63 bassins versants)	15	31	17	9
... dans le sous-échantillon (34 bassins versants)	4	19	11	9

On a représenté en Figure 3.4 la répartition de la taille des bassins versants, et en Figure 3.5 la répartition de leur altitude moyenne (calculée par MNT). On peut y vérifier que les bassins sont bien répartis entre 5 et 89 km². Aucune classe de taille n'est donc avantagée entre ces limites. Pareillement, la distribution suivant les classes d'altitude est relativement uniforme (Figure 3.5) entre 300 et 1400 m.

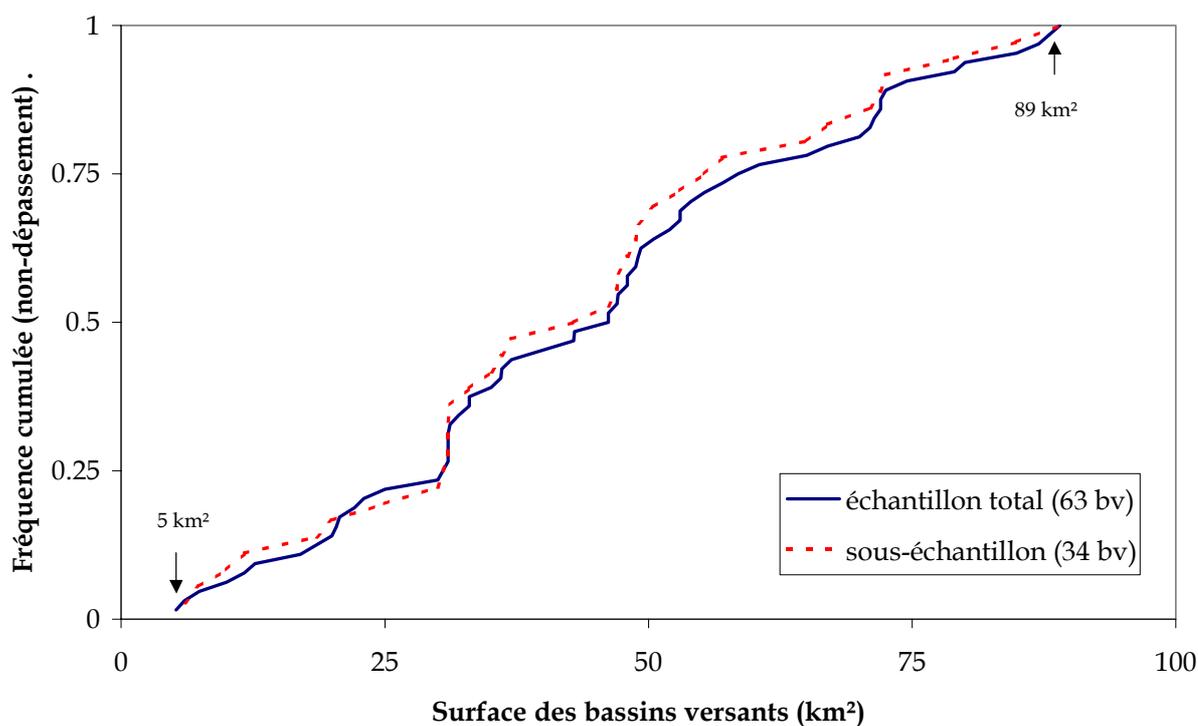


Figure 3.4 : répartition des tailles des bassins versants de notre échantillon (pour l'échantillon total, moyenne : 45 km², médiane : 46 km², écart type : 22 km²)

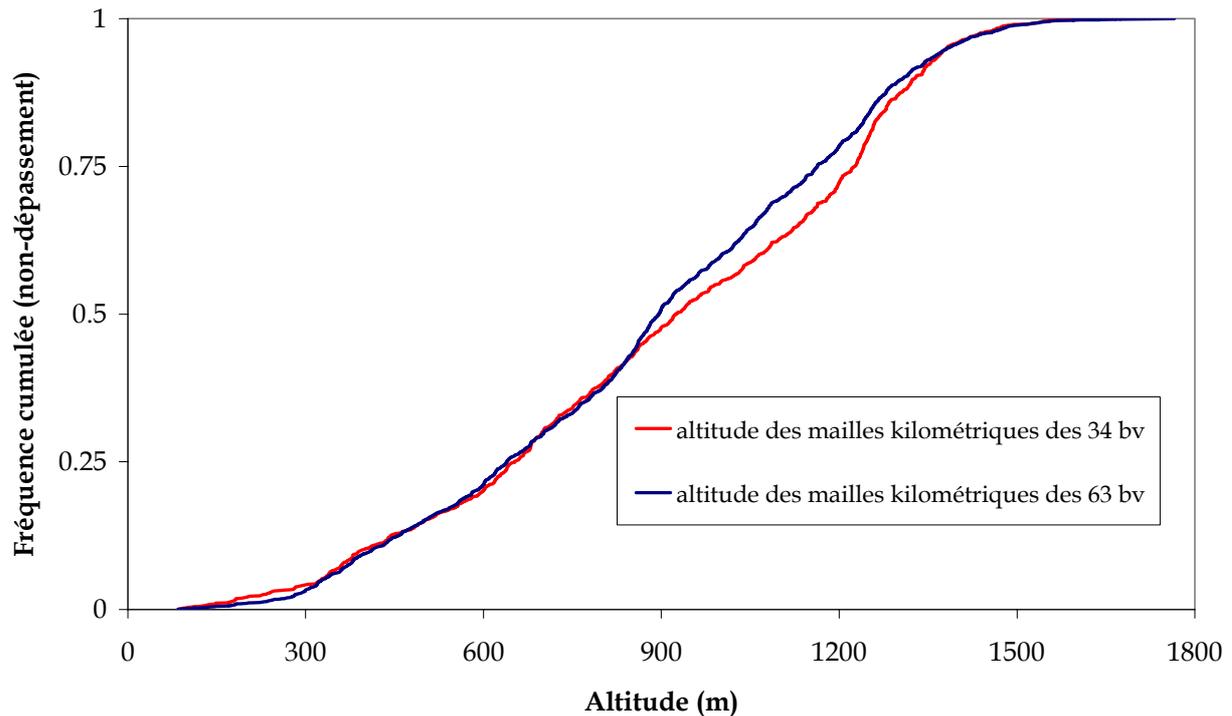


Figure 3.5: répartition des altitudes moyennes des bassins versants de notre échantillon

3.3 Constitution de la base de données de pluies et de débits

La base de données sur laquelle se fondent nos travaux hydrologiques comprend 4460 années-stations de pluies journalières (207 postes) et 1920 années-stations de débits journaliers. Elle a été constituée grâce à la collaboration de Météo France et de la direction de l'Eau du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, qui nous ont fourni gratuitement les données.

Les bassins versants étant choisis, nous avons procédé à la sélection des postes pluviométriques à utiliser pour décrire la pluie de bassin en entrée du modèle pluie-débit. Plusieurs problèmes se sont alors posés :

- la **taille des bassins** de notre échantillon (moyenne : 45 km²) est **assez faible devant la densité moyenne de postes pluviométriques**, que ce soit au plan national (1 poste par 124 km²) ou dans le Massif central (1 poste par 107 km²). Le nombre moyen de postes pluviométriques disponibles *a priori* pour chaque bassin versant est donc limité. Dans ce contexte, nous avons dû avoir recours à l'ensemble des postes disponibles à proximité du bassin, et non pas seulement à ceux qui se trouvent sur le bassin;
- le **faible nombre de postes disponibles présentant une chronique ininterrompue sur toute la période d'étude** : pour l'étude des tendances dans la transformation pluie-débit, nous n'avons retenu comme postes pluviométriques descripteurs du bassin que ceux disponibles sur l'ensemble de la période

d'étude du bassin¹ (dans ce qui suit, nous appellerons ces postes « *postes de longue durée* »). Ceci réduit encore le nombre de postes disponibles pour la modélisation pluie-débit (Tableau 3.4) ;

- **la mauvaise répartition altitudinale des postes pluviométriques** : elle s'explique simplement par la nécessité de disposer d'un observateur (le plus souvent bénévole) pour relever chaque jour le pluviomètre. Les postes se concentrent donc à basse altitude, souvent dans les vallées, à proximité des habitations. Ce n'est que depuis le début des années 1990 que des stations automatiques sont apparues en altitude. La Figure 3.6 illustre ce point, en montrant que la distribution des altitudes sur les bassins versants de l'échantillon est nettement décalée vers la droite par rapport à la distribution des altitudes des postes pluviométriques (ici, nous n'avons retenu que les postes de longue durée). Cela se traduit par une altitude médiane des bassins versants supérieure de 200 m à l'altitude médiane des postes pluviométriques.

Tableau 3.4 : caractéristiques de la base de données hydro-météorologiques des 63 bassins versants de notre échantillon (*note : l'ETP ne figure pas dans ce tableau, dans la mesure où nous n'utilisons que des valeurs moyennes inter-annuelles ; la base de données disponible pour l'ETP est présentée en détail au chapitre 6.*)

	Moyenne	Ecart type	Médiane	Extrêmes
Débits				
Période couverte par la chronique ²	33 ans	12 ans	32 ans	15-68 ans
Nombre d'années où des données de débit sont présentes ³	29 ans	10 ans	30 ans	12-67 ans
Pluies				
Nombre total de postes par bassin	4.3	1.7	4	2-10
Nombre de postes de longue durée par bassin	2.4	1.0	2	1-5

¹ Cette approche est préférable lorsque l'on recherche des tendances du comportement hydrologique. Comme le disent Lørup et al. (1998), l'objectif est « *to insure consistency in the data input over the whole modelling period and thereby avoid any bias that a change in the use of rainfall stations may have introduced* »

² Calculée en prenant la première et la dernière année de la chronique.

³ Calculé en excluant les années où les données sont manquantes.

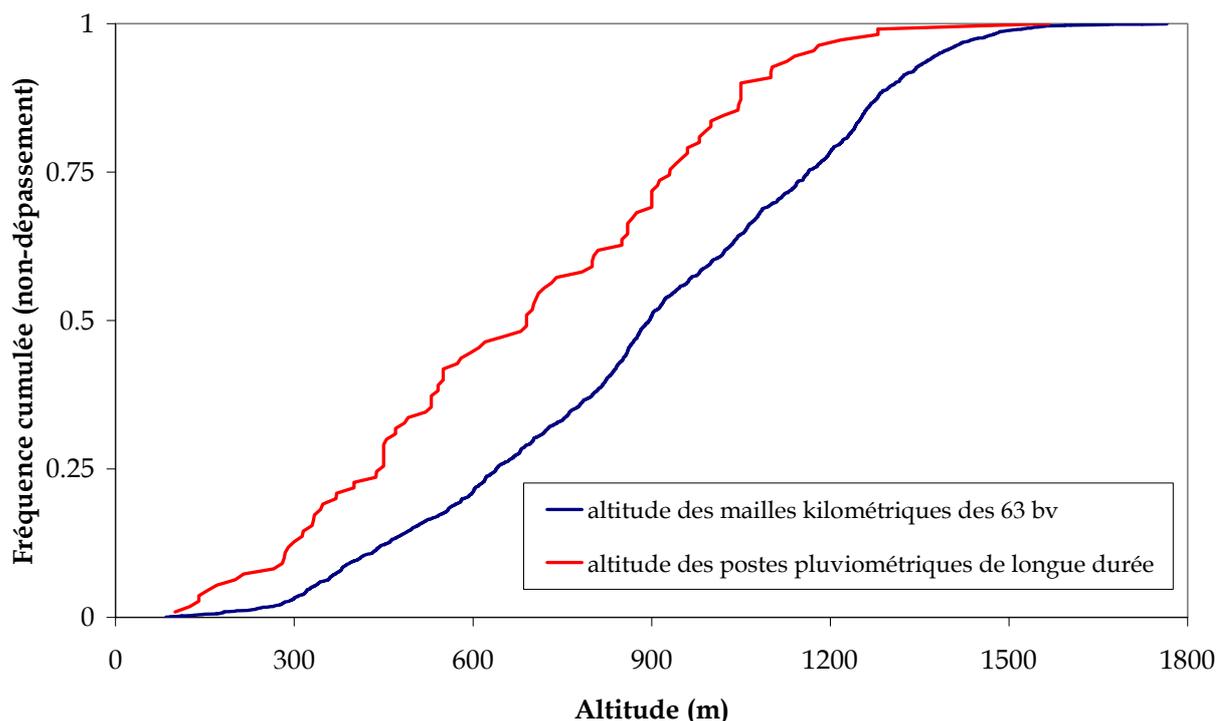


Figure 3.6 : distribution des altitudes des postes pluviométriques et des bassins versants (discrétisés par mailles de 1 km²)

Notons enfin que les données pluviométriques journalières faisant l'objet d'une critique préalable par les services de Météo France, nous n'avons pour notre part fait aucune critique de celles-ci.

3.4 Conclusion du chapitre 3

La base de données hydrologiques et météorologiques que nous avons pu constituer comprenait au total 71 bassins versants. Huit bassins versants ayant été écartés pour des raisons objectives, il reste 63 bassins versants sur lesquels va porter l'analyse des tendances du comportement hydrologique du bassin versant (chapitres 9 et 10). Une fiche descriptive des caractéristiques de chaque bassin, ainsi que de la base de données débitmétriques et pluviométriques disponible se trouve en Annexe II.1

Parmi les 63 bassins versants, 34 ont été traités au plan de l'évolution du couvert forestier. C'est sur ce sous-ensemble que portera l'analyse de la relation entre évolution du comportement hydrologique et évolution du couvert forestier (chapitre 11).

Notons enfin que cette base de données offre pour l'avenir des perspectives de poursuite de cette recherche dans deux directions :

- d'une part, sur les 34 bassins versants traités à la fois pour l'occupation des sols et pour la relation pluie-débit, 25 sont encore jugés à l'heure actuelle. Il serait

donc possible, dans une quinzaine d'années, de reprendre cette étude avec des séries beaucoup plus longues ;

- d'autre part, il reste bien sûr 29 bassins versants que nous n'avons pas pu traiter pour ce qui est de l'évolution du couvert forestier dans le cadre de cette thèse faute de temps. Il y a là le potentiel pour étendre encore de façon importante l'échantillon d'étude.

4 ETUDE DU COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DES BASSINS VERSANTS

4.1 Qu'est-ce que le comportement d'un bassin versant?

Avant de discuter des méthodes qui peuvent nous permettre d'analyser le comportement hydrologique d'un bassin versant et d'y détecter d'éventuelles tendances, il importe de préciser ce que nous entendons par comportement, de présenter les outils existant pour le décrypter.

Par comportement, nous entendons la façon dont le bassin versant, en tant que système, transforme les entrées climatiques (précipitations et demande évaporative) en écoulement. Nous considérons ce comportement comme une caractéristique intrinsèque, une véritable empreinte digitale du système, comme aiment le dire les hydrologues américains.

Vu de cette façon, le *comportement hydrologique* s'oppose au *régime hydrologique* de deux points de vue :

d'un point de vue temporel : le comportement du bassin versant prend en compte l'évolution temporelle de son état interne (son niveau d'humidité par exemple), de telle sorte que pour une même pluie, la réponse du bassin versant sera tout à fait différente selon que celui-ci est « sec » ou « saturé ». La notion de régime s'abstrait de cette cohérence temporelle : ainsi, la seule information que la description statistique du régime peut nous apporter est la valeur la plus probable du débit pour un mois donné ;

du point de vue de la méthodologie de description : la description statistique que l'on peut faire du régime est strictement conditionnée par la chronique des réalisations climatiques, alors que le modèle de comportement (qui est nécessairement un modèle pluie-débit) tente¹ de s'affranchir de cette dépendance en identifiant des paramètres invariants de la relation pluie-débit.

On peut comparer la différence qui existe entre *comportement hydrologique* et *régime hydrologique* à celle qui sépare les concepts de *génotype* et de *phénotype* en génétique. Le génotype, qui contient toutes les potentialités d'évolution de l'individu est analogue au comportement du bassin versant ; le phénotype, qui représente l'intégration de l'expression du génotype conditionnellement à l'environnement dans lequel l'individu s'est développé, est analogue au régime hydrologique. Une variété de blé ayant le gène « fort rendement » aura toutes les chances d'être très productive, sauf si son alimentation en eau et en éléments minéraux a été carencée pendant sa croissance. Un bassin versant ayant de faibles réserves souterraines aura toutes les chances de s'arrêter de couler pendant la saison sèche, sauf si la période d'observation est très humide. Face à un plant de blé inconnu, si l'on souhaite savoir

¹ Bien entendu, les modèles de comportement n'étant pas parfaits, ils peuvent garder une certaine dépendance par rapport à la période utilisée pour leur calage (leur apprentissage).

Partie II – Comment identifier les modifications du comportement hydrologique ?

s'il appartient génétiquement au groupe des « forts rendements », on a le choix entre le tester dans un environnement optimal ou rechercher la réponse dans son génotype. Face à un bassin versant inconnu, si l'on souhaite savoir s'il appartient au groupe des « faibles réserves souterraines », on a le choix entre continuer les observations pendant une longue période, ou identifier son comportement au moyen d'un modèle pluie-débit (trois années de débit et quatre années de pluie suffiront à optimiser ses paramètres). Remonter au génotype ou au comportement hydrologique permet donc de gagner ce qu'il existe de plus précieux : le temps.

Dès lors que les séries de débit disponibles pour résoudre un problème sont courtes, la description du comportement présente, par rapport à celle du régime, l'avantage de pouvoir s'appuyer sur des séries de pluie (souvent beaucoup plus longues et mieux distribuées), afin d'enrichir la description des réalisations possibles du bassin versant.

4.2 Comment peut-on décrire le comportement d'un bassin versant ?

Le comportement n'étant pas un phénomène directement observable, sa description et son analyse doivent nécessairement faire appel à un modèle. Les modèles hydrologiques décrivant le comportement du bassin versant sont des modèles pluie-débit. Il existe plusieurs clés de classification de ces modèles, et nous présentons les plus courantes au Tableau 4.1.

Tableau 4.1 : différents types de classifications utilisées pour les modèles pluie-débit

Clé de classification	Catégories de modèles
<i>pas d'espace</i>	modèle global modèle semi-distribué modèle distribué
<i>pas de temps des données</i>	modèle horaire modèle journalier modèle mensuel modèle annuel
<i>fondement théorique</i>	modèle empirique modèle conceptuel modèle théorique (fondé sur la physique)
<i>approche de développement</i>	modèle « boîte noire » modèle à réservoir (SMA ou WMA) modèle fondé sur la physique

Aucune des classifications n'étant parfaite, nous avons retenu celle *des approches de développement* (Perrin, 2000), qui nous permet de distinguer de façon simple les possibilités d'analyse des changements du comportement du bassin versant. A présent, nous présentons brièvement les caractéristiques de chaque classe de modèles (on peut se référer à Nascimento (1995) et à Perrin (2000) pour une discussion plus approfondie).

4.2.1 Les modèles «boîte noire»

Dans la catégorie des modèles « boîte noire », on peut classer les modèles ou sous-modèles qui établissent un lien purement mathématique entre les variables d'entrée du système et ses variables de sortie. Nous décrivons ici de manière succincte deux types de modèles très répandus : les modèles ARMAX et les réseaux neuronaux.

Les modèles linéaires de type ARMAX (Auto-Regressive Moving Average with exogenous inputs) développés par Box et Jenkins (1976) sont parmi les plus simples et les plus répandus en géosciences ; leur principal intérêt réside dans leur solide fondement mathématique, qui s'appuie sur la théorie des systèmes linéaires (Salas, 1993). Bien que certains auteurs aient rapporté des résultats satisfaisants en hydrologie, ces modèles trouvent leur limite dans le fait que leur linéarité n'est pas adaptée pour représenter la transformation pluie-débit, typiquement non-linéaire. De façon générale, leurs performances sont nettement inférieures à celles des modèles à réservoir. Ainsi, Edijatno et al. (1999) ont comparé un modèle pseudo-linéaire à 16 paramètres à deux modèles à réservoir, GR3J et TOPMO. Le modèle pseudo-linéaire s'est révélé nettement moins performant. Perrin (2000) a également comparé un modèle « boîte noire » (pourtant non linéaire) aux 38 structures à réservoir qu'il a testé. Il conclut que même la moins performante des structures à réservoir reste encore très nettement supérieure au modèle « boîte noire ».

Contrairement aux modèles précédents, les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont non-linéaires. Depuis le début des années 1990, ces modèles ont été testés par de nombreux auteurs pour représenter la transformation pluie-débit (voir par exemple Hsu et al., 1995). Malgré certains succès, ces modèles restent délicats d'utilisation en raison de leur sur-paramétrisation : ils nécessitent des périodes d'apprentissage très longues. Sur des périodes relativement courtes, ils sont moins robustes que les modèles à réservoir. De plus, ces modèles sont essentiellement adaptés à des applications telles que la prévision des crues (François Anctil, communication personnelle), l'absence de mémoire de longue durée étant un obstacle majeur pour d'autres applications.

Les modèles «boîte noire» se caractérisent donc par une assez grande facilité mathématique de mise en œuvre (mais ils souffrent alors de leur linéarité qui limite leur capacité à représenter le comportement des bassins versants), mais aussi par leur sur-paramétrisation et par leur opacité (qui peuvent limiter leur robustesse et rendent périlleuse leur interprétation).

4.2.2 Les modèles à réservoir (conceptuels et empiriques)

La catégorie des modèles à réservoir correspond à ce que les auteurs américains des années 1960 ont appelé *Soil Moisture Accounting (SMA) models*, appellation qu'il serait peut-être préférable de transformer en *Watershed Moisture Accounting (WMA) models*.

Les modèles à réservoir se distinguent des modèles « boîte noire » dans la mesure où ils décomposent de manière explicite la transformation de la pluie en débit en sous-

Partie II – Comment identifier les modifications du comportement hydrologique ?

processus¹. Ces modèles peuvent être globaux ou semi-distribués (le bassin versant est alors représenté comme un assemblage de sous-bassins versants traités, eux, globalement). La mémoire du système est représentée par des réservoirs, qui se vident et se remplissent au gré des précipitations. Ces modèles sont donc bien moins abstraits que les modèles « boîte noire », même si l'explication de leurs paramètres de calage par les propriétés physiques du système naturel reste délicate, notamment en raison des compensations qui peuvent intervenir entre paramètres.

On distingue généralement dans ces modèles deux composantes majeures :

- *la fonction de production* : responsable du bilan en eau du bassin, c'est à dire de la transformation de la pluie brute (pluie incidente) en pluie efficace (destinée à s'écouler) ;
- *la fonction de transfert* : responsable de la répartition temporelle de la pluie nette.

Cette distinction est pratique mais un peu simpliste, car tous les modèles ne séparent pas de façon absolue les deux fonctions, certains réservoirs ayant des fonctions à la fois de production et de routage.

Le fonctionnement des modèles à réservoir dépend de paramètres qui doivent toujours être déterminés par calage (procédure numérique itérative comparant débits calculés et débits observés sur une période d'apprentissage), cela malgré les nombreuses études de régionalisation réalisées au cours des trente dernières années, et dont l'objectif était justement d'établir une relation entre des caractéristiques physiques du bassin et les valeurs des paramètres des modèles. Une description des principaux modèles à réservoir existants est donnée par Perrin (2000). Parmi les plus connus, on peut citer le NWSRFS (National Weather Service River Forecast System, dit aussi modèle de Sacramento ; Burnash, 1995), HBV (Bergström, 1995), NAM (Havnø et al., 1995), TANK (Sugawara, 1995), IHACRES (Jakeman et al., 1990), TOPMODEL (Beven et al., 1995), GR3J (Edijatno et al., 1999) et GR4J (Perrin, 2000).

La distinction, au sein de la catégorie des modèles à réservoirs, entre modèles conceptuels et empiriques n'a pas d'implication pour ce qui est de la performance, la robustesse ou la complexité des modèles, ni généralement pour la procédure d'estimation de leurs paramètres (les modèles conceptuels n'échappent pas au calage). Elle traduit uniquement l'approche du modélisateur :

dans l'approche conceptuelle, le modélisateur se rattache à des concepts physiques, à une représentation qu'il s'est faite des processus qu'il estime contrôler la réponse du bassin versant. Devant l'impossibilité de mesurer sur le terrain tous les paramètres nécessaires à une représentation purement physique, conscient des contraintes imposées par les pas d'espace et de temps usuels en hydrologie, le modélisateur doit se résoudre à caler les paramètres de son modèle. Il continue cependant à leur attribuer une certaine vraisemblance physique ;

¹ Ces « processus » n'ont pas nécessairement de lien univoque avec les processus physiques à l'œuvre sur le bassin versant.

dans l'approche empirique, il n'y a pas d'interprétation a priori des processus en jeu sur le bassin. Cette approche traduit une reconnaissance de la grande complexité des processus hydrologiques pouvant intervenir sur un bassin versant, et de la variabilité spatio-temporelle des paramètres du milieu. L'approche empirique reconnaît également que les pas de temps et d'espace utilisés se conjuguent pour faire perdre toute crédibilité physique à des paramètres calés : ces derniers doivent en effet rendre compte à la fois de la variabilité spatiale extrême au sein d'un modèle global, et surtout, d'une variabilité temporelle, alors que les données disponibles ne sont que journalières¹. Enfin, l'approche empirique met l'accent sur les difficultés d'estimation numérique des paramètres des modèles : cette difficulté n'est pas vue comme une limite des méthodes d'optimisation², mais comme une limite liée essentiellement aux défauts du modèle et, dans une moindre mesure, à la quantité limitée d'informations disponibles dans les chroniques de pluie et de débit.

Si la plupart des modèles existant dans la littérature sont le fruit d'une démarche conceptuelle, il est intéressant de remarquer que l'approche empirique fut pourtant préconisée dès les débuts de la modélisation hydrologique par deux grands hydrologues, Nash et Sutcliffe (1970) : partant du constat que les conditions aux limites des modèles (c'est à dire la description physique du bassin et la distribution initiale de ses propriétés physiques) sont indéfinissables, ils estimaient qu'il n'est pas envisageable d'appliquer les lois de la physique pour représenter la transformation de la pluie en débit « *as there is little point in applying exact laws to approximate boundary conditions* »³. La démarche qu'ils ont proposée pour mettre au point un modèle pluie-débit consistait à démarrer d'une représentation très simple, et à ne complexifier ensuite le modèle que si la nécessité de cette complexification était démontrée : « *we are prepared to accept additional parts and hence greater difficulty in determining parametric values only if increased versatility of the model makes it much more likely to obtain a good fit between observed and computed output* »⁴. Autrement dit, ce sont les données observées qui commandent le développement d'un modèle empirique, alors que ce sont les idées a priori sur la physique des phénomènes en jeu qui commandent le développement des modèles conceptuels.

4.2.3 Les modèles fondés sur la physique

Les modèles fondés sur la physique ont pour ambition d'utiliser un cadre théorique strict pour représenter l'ensemble des processus en jeu à l'échelle du bassin versant.

¹ Le problème subsiste même pour des données horaires : pour résoudre de façon satisfaisante les équations différentielles gouvernant l'infiltration, il faudrait sans doute des données de pluie au pas de temps de la minute !

² Les années 80 et 90 ont vu fleurir une multitude de méthodes d'optimisation qui, malgré leur élégance et leur capacité à utiliser des ressources informatiques toujours plus importantes, n'ont pas résolu le problème.

³ « *Appliquer des lois exactes à des conditions aux limites approximatives n'a guère de sens.* »

⁴ « *Nous sommes prêts à accepter des parties supplémentaires [dans le modèle], et ainsi une plus grande difficulté pour déterminer les valeurs des paramètres uniquement si les degrés de liberté supplémentaires améliorent nettement le capacité du modèle à faire coïncider les valeurs observées et calculées.* »

Pour cela, ils doivent tenir compte de manière explicite¹ de la variabilité spatiale du bassin, qui doit donc être discrétisé finement en un ensemble de mailles. Les lois de la physique sont appliquées à chaque maille, qui doit être caractérisée pour chacun des paramètres de ces lois².

En théorie, ces modèles devraient être les outils rêvés pour toute étude hydrologique, dans la mesure où ils tentent d'explicitier l'ensemble des chemins de l'eau, ainsi que les flux d'eau, de matière et d'énergie au sein du bassin versant. De plus, ils ne devraient nécessiter aucun calage numérique. Mais en pratique, la mesure des paramètres distribués étant impossible, on aboutit à un très grand nombre de paramètres indéterminés (Wheater et al., 1993). De plus, la validation de ces modèles et des hypothèses physiques qui sous-tendent leur structure est quasiment impossible. La plupart des hydrologues renoncent donc à les utiliser, considérant « qu'ils ne sont, en réalité, que des réseaux de neurones améliorés, dont la seule justification est qu'ils sont capables de suivre un processus d'apprentissage » (de Marsily, 1994).

4.2.4 Y a-t-il des raisons philosophiques pour écarter les modèles empiriques au profit des modèles conceptuels et fondés sur la physique ?

Aussi bien à l'intérieur du cercle fermé des hydrologues qu'à l'extérieur, la discussion du choix d'un modèle est parfois stoppée net par des positions dites « de principe », qui consistent à ériger en dogme la légitimation physique *a priori* d'un modèle de bassin versant. Nous pensons que cette position n'est pas raisonnable, pour deux raisons, l'une d'ordre théorique, l'autre d'ordre pratique :

En sciences, de nombreuses formulations, aujourd'hui acceptées comme parfaitement physiques, ont des fondements empiriques : on peut citer la loi de Darcy d'écoulement dans les milieux poreux par exemple.

D'un point de vue pratique, une position rigide nous semble indéfendable. Illustrons son aspect déraisonnable par un exemple issu de la médecine : considérons un enfant qui souffre de troubles du comportement. Pour essayer de le soigner, deux solutions s'offrent : consulter un neurochimiste, ou consulter un psychiatre. Le neurochimiste est un spécialiste du cerveau ; il sait tout du neurone, de l'axone aux synapses et aux neurotransmetteurs. Après tout, le cerveau n'est qu'un assemblage de quelques milliards de neurones, et les problèmes de son enfant ont nécessairement une explication dans un dérèglement chimique. Le psychiatre est un médecin qui, consulté pour un trouble du comportement, s'intéresse avant tout à l'individu dans sa globalité. Il connaît les bases chimiques du fonctionnement du cerveau, mais sa connaissance des troubles du comportement est avant tout basée sur une approche

¹ Ce point est important : un modèle global peut à l'évidence tenir compte, dans une certaine mesure (et de façon *implicite*), de la variabilité spatiale au sein du bassin versant, de la même façon qu'un écart-type tient compte de façon simplifiée de la dispersion des éléments d'un ensemble.

² Ceci pose, comme le note de Marsily (1994), des problèmes : ces modèles continuent malgré leur aspect distribué à considérer comme homogènes des surfaces très importantes (les mailles carrées font souvent 1 km de côté, 100 m dans le meilleur des cas), et à l'échelle de ces mailles, il est certainement illusoire de vouloir utiliser des lois qui ont été établies à l'échelle microscopique (celle de Richards par exemple). Dans ce cas, il semble bien que les modèles à base physique soient conceptuels à l'échelle d'une maille (Beven, 1989; Edijatno et al., 1999).

empirique. Quelle option choisir? Il nous semble qu'une grande partie des parents préfèrerait consulter le psychiatre....

En conséquence, nous pensons que l'on ne peut refuser à un bassin versant une approche empirique de son fonctionnement, le nombre de pores interagissant dans le sol n'étant certainement pas inférieur au nombre de neurones du cerveau humain.

4.2.5 Quelles sont les possibilités offertes par chacune des classes de modèles pour l'analyse de notre échantillon de bassins versants ?

Dans cette section, nous analysons les avantages et les inconvénients de chacune des classes de modèles pour l'identification des changements du comportement des bassins versants.

Une remarque préliminaire s'impose : malgré l'attraction qui nous porte tous à favoriser la description physique des phénomènes naturels, la classe des modèles *fondés sur la physique* n'est pas utilisable pour cette recherche : au-delà des problèmes fondamentaux concernant l'échelle à laquelle peuvent être utilisés les équations de la physique (de Marsily, 1994), le problème des données est tout simplement insoluble. Il nous est impossible de remonter dans le temps pour recueillir les données nécessaires.

On peut aussi rapidement éliminer les modèles «boîte noire». Pour les modèles de type ARMAX, les performances sont à l'évidence trop faibles. Cette faible performance est synonyme de résidus importants, qui augmenteraient considérablement la part de bruit au sein du signal que nous essayons de décrypter. Pour les modèles de type «réseau de neurone», nous ne nous intéressons pas ici aux applications telles que la prévision de crue pour lesquelles ces modèles sont performants. De plus, ces modèles n'ont pas démontré de nette supériorité sur les modèles à réservoir (pourtant beaucoup plus simples) dès lors que les périodes de calage sont relativement courtes (F. Ancil, communication personnelle).

Les modèles à réservoir semblent donc à notre avis les mieux adaptés pour décrire le comportement des bassins versants de notre échantillon d'étude, l'évolution comportementale pouvant être approchée au travers de calages successifs sur l'ensemble de la période où les données de pluie et de débit sont disponibles.

La question de l'aspect global ou distribué du modèle à utiliser se pose ensuite. Dans notre cas, plusieurs raisons militent pour le choix d'un modèle global : la disponibilité des données d'entrée avant tout. Nous avons expliqué au chapitre 3 comme il était difficile de rassembler des postes pluviométriques situés sur les bassins ou à proximité immédiate, et disponibles sur l'ensemble de la durée d'analyse. Dans ces conditions, adopter une représentation distribuée n'aurait guère de sens, dans la mesure où l'on n'aurait pas la possibilité d'alimenter le modèle en pluies distribuées. De plus, il nous semble essentiel de pouvoir valider la performance du modèle que nous utilisons. En l'absence de stations de mesure du

débit sur des sous-bassins versants, cette validation n'est possible qu'à l'échelle globale, ce qui impose donc le type de modèle à utiliser¹.

La question du pas de temps est simple à régler : le pas de temps minimal est imposé par le caractère journalier des observations de pluie dans notre base de données. Nous avons donc choisi de l'utiliser, dans la mesure où il offre la plus grande richesse d'informations sur le comportement du bassin versant. Un pas de temps plus large (mensuel ou annuel) nous priverait d'une approche de la dynamique des bassins, notamment en ce qui concerne les crues.

Enfin, la question du choix entre modèles conceptuels et empiriques n'a à notre avis aucun sens, dans la mesure où 1) ces modèles sont très semblables dans leur structure, 2) Perrin (2000) a montré que leurs performances pouvaient être très voisines, 3) nous considérons que les modèles conceptuels perdent une grande partie de leur justification physique (si ce n'est la totalité) en raison de la nécessité d'identifier leurs paramètres par une procédure d'optimisation : la covariance des paramètres ainsi déterminés est importante, et d'autant plus importante que les modèles sont riches en paramètres. Critiquant la tendance à la sur-paramétrisation, Jakeman et Hornberger (1993) considèrent d'ailleurs que 4 à 6 paramètres suffisent à représenter la transformation pluie-débit ; Perrin (2000) montre sur un échantillon de 429 bassins versants que des modèles de 3 à 5 paramètres peuvent être aussi satisfaisants (en mode validation), que des modèles comptant davantage de degrés de liberté.

Notons que le choix d'un modèle empirique n'exclut pas nécessairement la recherche *a posteriori* d'interprétations physiques (c'est après tout l'approche courante en médecine). Nascimento (1995) écrit à ce sujet : « *Bien que les modèles empiriques ne prétendent pas donner d'explications causales, il ne les excluent pas et l'approche structurale n'est pas incompatible avec la causalité. Dans certains cas les modèles empiriques peuvent interagir avec des hypothèses réalistes permettant d'une part de mieux raisonner sur les vrais mécanismes hydrologiques et d'autre part d'améliorer le bien-fondé de la modélisation.* »

4.3 Sélection d'un modèle pluie-débit adapté à notre problématique

Perrin (2000) propose dans sa thèse une comparaison des performances de 38 structures pluie-débit, susceptibles d'être utilisées pour notre étude. Etant donné la taille de son échantillon total (429 bassins), qui assure une validation des structures sur des situations très variées, il était logique de partir des meilleurs modèles qu'il avait identifiés, pour tester leurs performances sur notre échantillon. Nous avons donc testé GR4J, TOPMO (version modifiée de Topmodel à 8 paramètres) et HBV (version à 9 paramètres), qui présentaient les meilleures performances au contrôle, en utilisant comme critère de performance (et comme critère d'optimisation) le critère

¹ Notons que ce choix est fait par d'autres hydrologues étudiant des changements de comportement des bassins versants, même lorsqu'ils appartiennent à des institutions promotrices d'approches à la fois physiques et distribuées. Ainsi, Lørup et al. (1998), justifient leur utilisation d'un modèle global conceptuel (NAM) de la façon suivante : « *for Zimbabwean conditions, NAM performed just as well as the semi-distributed WATBAL model and the distributed physically-based MIKE SHE model, provided that a runoff record with a length of at least 1 year was available for calibration* ».

de Nash calculé sur les racines carrées des débits¹. Pour une description des modèles et de la méthodologie de calage, on se référera à Perrin (2000).

Pour cette comparaison, nous avons utilisé l'échantillon de 63 bassins, et deux périodes de calage contiguës par bassin (afin de pouvoir considérer que le couvert forestier n'a pas eu le temps de changer le comportement du bassin entre chaque période). Le calage a été effectué sur 3 années, plus un an pour l'initialisation. Les résultats au contrôle sont obtenus la deuxième période de trois ans (celle qui n'a pas servi au calage) ainsi que Klemeš (1986) le recommande.

Nous présentons en Figure 4.1 les résultats de la comparaison au calage et en Figure 4.2 les résultats au contrôle. Notons que l'interprétation des places respectives des modèles sur ces figures doit être faite de la façon suivante : plus sa distribution est déplacée vers la droite, plus le modèle est bon.

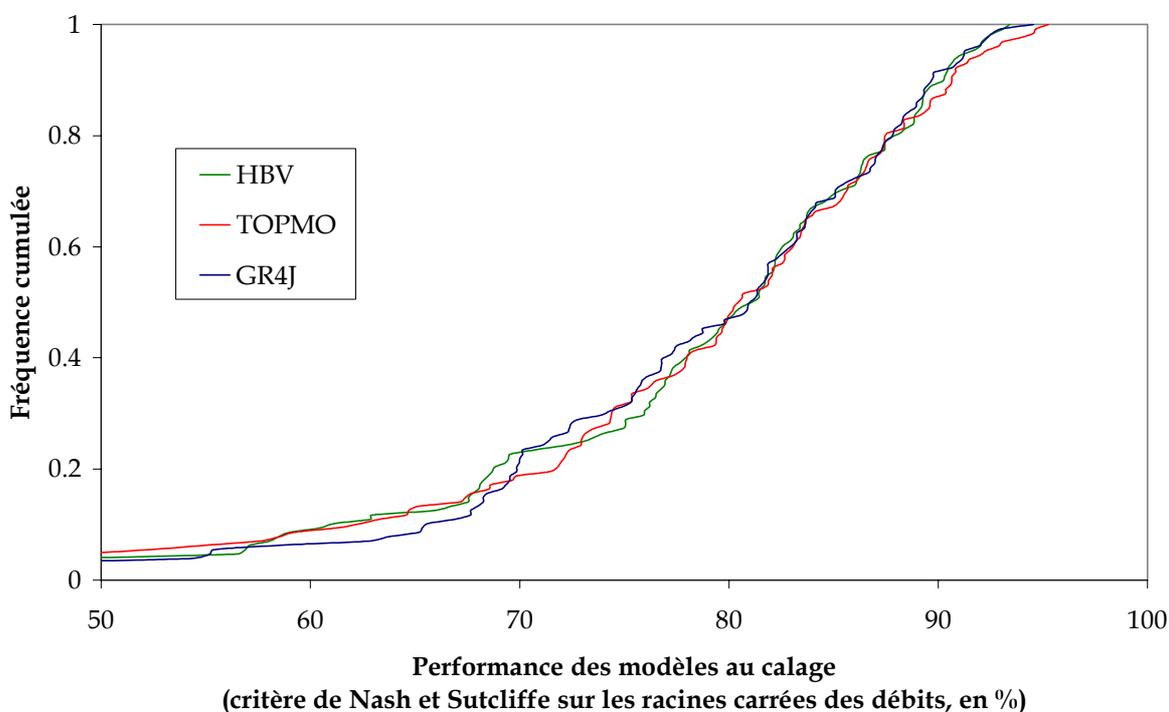


Figure 4.1 : distribution des résultats au calage des trois modèles comparés

On observe qu'au calage, les distributions des trois modèles sont très peu différentes. Au contrôle, en revanche, GR4J (dont la distribution est la plus à droite sur le graphique), montre une supériorité claire. On retrouve ainsi, sur notre échantillon de bassins versants du Massif central, le résultat de Perrin, indiquant une meilleure robustesse pour le modèle GR4J.

¹ Avec une telle transformation des débits, on réduit le poids des crues dans le critère d'optimisation et on assure ainsi un calage « équilibré » sur l'ensemble de la gamme des débits.

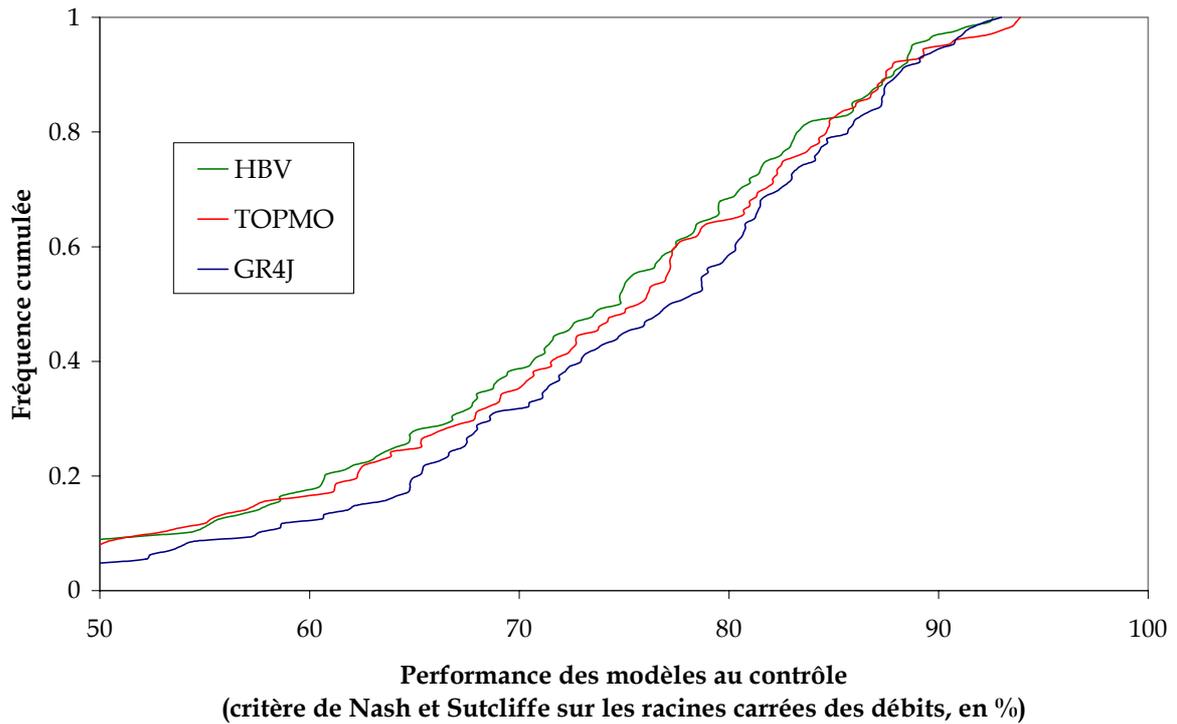


Figure 4.2 : distribution des résultats au contrôle des trois modèles comparés

En conclusion, nous avons décidé d'utiliser dans le reste de notre étude GR4J pour l'analyse et la simulation du comportement des bassins versants, ce modèle alliant la parcimonie (seulement 4 paramètres) et la performance.

CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE

L'échantillon de bassin versants que nous avons pu rassembler pour cette recherche comporte au total 63 bassins versants pour lesquels des données de débit et de pluie ont pu être rassemblées. Nous avons pu constituer une base de données d'évolution du couvert forestier pour un sous-échantillon de 34 bassins versants.

L'analyse des performances en validation des meilleurs modèles à réservoir disponibles pour représenter la relation pluie-débit sur nos bassins versants a montré que le modèle GR4J, mis au point au Cemagref d'Antony, combinait **parcimonie** (un faible nombre de paramètres rendant leur optimisation facile) et **performance**. C'est donc ce modèle que nous nous proposons de tester plus avant et d'utiliser dans les chapitres suivants.

Partie III - Questions de modélisation hydrologique

« notre regard n'est point assez vaste pour embrasser dans son ensemble le circuit de la goutte, et nous nous bornons à la suivre dans ses détours et ses chutes depuis son apparition dans la source jusqu'à son mélange avec l'eau du grand fleuve ou de l'océan. Faibles comme nous le sommes, nous tâchons de mesurer la nature à notre taille ; chacun de ses phénomènes se résume pour nous en un petit nombre d'impressions que nous avons ressenties. »

Élisée Reclus (1869)

L'objectif de cette troisième partie est de présenter la réflexion qui a été menée sur la sensibilité des modèles pluie-débit aux données d'entrée : pluie et évapotranspiration potentielle (ETP). Cette étude de sensibilité nous avait semblé nécessaire dans la mesure où, si nous souhaitions interpréter les simulations des modèles pluie-débit en terme d'influence de la forêt, il fallait pouvoir replacer cette influence éventuelle par rapport aux variables de forçage climatique du comportement du bassin versant. Et l'une des craintes que nous pouvions avoir était que le bruit lié à l'incertitude sur les entrées de pluie et d'ETP masque complètement l'impact du changement de couvert forestier.

Dans le chapitre 5, nous présentons les analyses qui portent sur l'impact de la mauvaise connaissance de la pluie. Nous examinons tout d'abord trois bassins versants pour lesquels on a une très bonne connaissance de la pluie, et sur lesquels nous faisons des tests en n'utilisant qu'une partie du réseau total de pluviomètres. Nous revenons ensuite à nos bassins du Massif central, où nous abordons la question de la correction globale de la pluie, pour rendre compte autant qu'il est possible, d'un biais systématique dans l'estimation de la pluie.

Le chapitre 6 traite de l'ETP. Nous y proposons pour le Massif central une régionalisation de l'ETP Penman fondée sur des données récentes de Météo France. Nous testons ensuite l'impact de cette meilleure connaissance temporelle et spatiale de l'ETP en termes de capacité du modèle pluie-débit à mieux représenter le fonctionnement du bassin versant.

Précisons que le chapitre 5 est résumé dans un article publié dans *Journal of Hydrology* (voir Annexe III.1) et que le chapitre 6 est résumé dans un article soumis à la même revue (voir Annexe III.5).

5 IMPACT DE LA MAUVAISE CONNAISSANCE DE LA PLUIE

La connaissance que nous pouvons avoir de la pluie qui s'abat sur un bassin versant est nécessairement imparfaite, dans la mesure où nous n'avons de possibilité de la mesurer (de l'échantillonner) qu'en un nombre très limité d'endroits¹. Les « nouvelles technologies » (réseau automatique télétransmis, radar) n'ont pas d'incidence pour notre étude : les réseaux automatiques sont encore bien peu nombreux sur le territoire, et très souvent (lorsqu'ils ont été mis en place à des fins d'annonce de crue par exemple), les données ne sont pas archivées sur l'ensemble de l'année. Les données radar ne sont archivées que depuis peu de temps, et leur utilisation hydrologique pose encore de très nombreux problèmes. Enfin, réseaux automatiques comme réseaux radar sont sujets à une très grande quantité de malfonctionnements, qui rend l'obtention de séries continues très difficile.

Pour notre recherche, nous avons souhaité utiliser des données issues de postes pluviométriques de longue durée, c'est à dire de postes exploités pendant l'ensemble de la période sur laquelle nous avons étudié chaque bassin versant. Cette décision est motivée par notre objectif : mettre en évidence des changements de comportement hydrologique dans les bassins versants. Or, un changement dans les postes pluviométriques peut engendrer une non-stationnarité factice dans la série pluviométrique utilisée en entrée du modèle, et faire apparaître un changement de comportement hydrologique qui ne serait qu'un artefact. En conséquence, il a fallu nous limiter à un très faible nombre de postes pluviométriques (entre un et cinq postes par bassin) pour décrire la pluie de bassin, ce qui a bien entendu des conséquences en matière d'incertitude liée à la pluie.

Nous avons donc cherché, en préambule à notre étude des tendances du comportement hydrologique, à évaluer les conséquences des incertitudes d'estimation de la pluie. Après une revue de la littérature existante en section 5.1, nous présentons en section 5.2 une approche originale d'étude des conséquences de la mauvaise connaissance de la pluie sur le comportement des modèles pluie-débit. Ensuite, en section 5.3, nous présentons deux tentatives de calcul d'un coefficient de correction de la pluie et nous analysons leur impact en terme d'amélioration apportée au fonctionnement du modèle. Enfin, nous tirons en section 5.4 les enseignements de ce chapitre, en essayant de dégager les pistes de recherche qui pourraient contribuer à éclaircir certaines questions.

Note : un article présentant une partie du travail contenu dans ce chapitre est reproduit en annexe 3.1 (*Andréassian, V., Perrin, C., Michel, C., Usart-Sanchez, I. and Lavabre, J., 2001. Impact of imperfect rainfall knowledge on the efficiency and the parameters of watershed models. Journal of Hydrology, 250(1-4): 206-223.*).

¹ En raison du coût important que représente la gestion d'un grand réseau de mesure, fut-il tenu par des bénévoles...

5.1 Importance de la donnée de pluie en modélisation pluie-débit : peut-on connaître la pluie qui s'abat sur un bassin versant ? Comment évaluer la sensibilité d'un modèle à une mauvaise connaissance de la pluie ?

Une revue de la littérature hydrologique traitant de l'étude des pluies montre que, dans la plupart des cas, les aspects hydrologiques de la pluie sont abordés sans faire référence à l'objectif de modélisation d'un bassin versant. Pourtant, seules les plantes utilisent directement l'eau de pluie, l'homme devant presque toujours se résoudre à l'utiliser après sa concentration par un bassin versant.

Même lorsque des articles traitent de sujets clairement hydrologiques, tels que l'estimation d'une pluie moyenne de bassin, ou la mise en place de réseaux pluviométriques pour la prévision de crue, il s'avère que de nombreux auteurs ne traitent pas de l'aspect « transformation pluie-débit » (Bastin et al., 1984; Bras et Colon, 1978; Creutin et Obled, 1982; Davis et al., 1972; Eagleson, 1984; Gole et al., 1972; Goodrich et al., 1995; Hendrick et Comer, 1970; Hershfield, 1967; Kelway, 1974; Lebel et al., 1987; Morrissey et al., 1995; O'Connell et al., 1979; Rodda, 1970; Rodriguez-Iturbe et Mejia, 1974a; Rodriguez-Iturbe et Mejia, 1974b; Seed et Austin, 1990; Stol, 1972; Sutcliffe, 1966; Tabios et Salas, 1985; Zawadzki, 1973). Si cette approche se comprend, il nous semble qu'elle est gênante dans la mesure où elle ne nous permet pas de nous concentrer sur les qualités et les défauts qui comptent réellement quand des données de pluie sont utilisées en entrée d'un modèle de bassin versant.

Cependant, certains hydrologues élèvent la voix pour protester contre cette approche. Ainsi, Sugawara (1993) écrit : « certaines personnes considèrent qu'il est possible d'obtenir une estimation optimale de la précipitation moyenne sur un bassin versant. Cependant, cette approche est scolastique et inutile, puisqu'il est impossible d'observer la pluie moyenne de bassin en soi »¹. Hamlin (1983) défend lui aussi la nécessité d'une approche empirique, utilisant un modèle de bassin versant pour étudier l'impact de la taille du réseau pluviométrique sur la qualité de la simulation des débits. Cette proposition rappelle celle de Linsley et Crawford (1965) qui, dans un article intitulé « *Coordination of precipitation and streamflow networks* », soutenaient qu'il serait bien plus rationnel de dimensionner un réseau d'acquisition de données dans le but de fournir une solution qui prenne en compte les besoins spécifiques pour lequel le réseau est établi. D'un point de vue de modélisateur, cela semble raisonnable, dans la mesure où l'on reconnaît depuis longtemps qu'un biais existant dans la définition de la pluie de bassin peut être - au moins partiellement - compensé lors de l'étape d'optimisation des paramètres du modèle (Dawdy et Bergmann, 1969; Melching, 1995). Des auteurs tels que Bras (1979), Bras et Rodriguez-Iturbe (1976), Storm et al. (1989) insistent quant à eux sur le fait que les bassins versants peuvent se comporter comme des filtres passe-bas, atténuant ainsi la variabilité de l'entrée pluviométrique.

¹ « Some people consider that we can obtain an optimum estimate of the mean areal precipitation over the basin. However, this approach is rather scholastic and useless, because we cannot observe the mean areal precipitation itself. »

Il est donc logique de penser que les caractéristiques d'un tel filtre devraient être prises en compte pour déterminer quel type d'information pluviométrique est nécessaire pour atteindre un certain degré de précision dans la simulation des débits.

O'Connell (1982) passe en revue la littérature existante sur le sujet de la conception des réseaux pluviométriques. Après avoir examiné les approches exclusivement fondées sur l'étude des champs de pluie, il identifie deux types d'approches se fondant sur la modélisation pluie-débit :

- (i) une première approche consiste à générer une pluie synthétique, qui alimente ensuite un modèle pluie-débit. Au moyen du modèle, le champ pluviométrique complet est transformé en un débit synthétique qui servira de référence. On peut alors échantillonner le champ de pluies pour simuler des réseaux pluviométriques, qui peuvent à leur tour être transformés en débits simulés. De la comparaison entre ces débits simulés et le débit synthétique de référence, des conclusions sont tirées sur la sensibilité des modèles pluie-débit à la limitation de l'information pluviométrique.
- (ii) une seconde approche consiste à utiliser des données réelles de pluie et de débit, et un modèle pluie-débit. Cette attitude diffère de la précédente dans la mesure où (1) le débit de référence (auquel sont comparés les résultats de modélisation) est un débit réellement mesuré et, (2) c'est un réseau pluviométrique réel qui est échantillonné pour produire des sous-ensembles de taille et de distribution spatiale variables.

O'Connell (1982) préfère l'approche (i), car il estime qu'elle permet l'étude d'un nombre quelconque de points d'échantillonnage, dans la mesure où l'on connaît le « vrai » champ de pluie. La plupart des références qu'il examine dans son article appartiennent à cette catégorie (Berndtsson et Niemczynowicz, 1988; Bras et Rodriguez-Iturbe, 1976; Duncan et al., 1993; Jettmar et al., 1979; Troutman, 1983; Wilson et al., 1979). Cependant, quelques auteurs utilisent l'approche (ii), fondant - au moins pour partie - leur travaux sur des données réelles (Beven et Hornberger, 1982; Dawdy et Bergmann, 1969; Michaud et Sorooshian, 1994a,b; Storm et al., 1989; Troutman, 1982). Enfin, Phanartzis (1972) utilise une approche mixte (réseau pluviométrique réel, mais référence des débits issue d'une simulation). Nous pensons pour notre part que l'approche (ii) est préférable pour étudier l'impact de notre connaissance limitée de la pluie sur la modélisation de bassin versant, pour les raisons suivantes :

- (a) avant tout, nous pensons que Sugawara (1993) a raison lorsqu'il insiste sur le fait qu'il est impossible d'observer la pluie moyenne réelle sur un bassin. Pourquoi alors faudrait-il fonder une analyse hydrologique sur ce concept, sachant qu'aucun des modèles dont nous disposons ne peut l'utiliser?
- (b) ensuite, nous croyons que l'utilisation de débits de référence simulés (dérivés de champs de pluie réels ou synthétiques) en lieu de débits réels est susceptible de biaiser les résultats. En effet, les modèles de bassin versant sont fondés sur une certaine conceptualisation de la transformation de la pluie en débit et ces

modèles ne représentent le comportement d'un bassin versant que de façon grossière. En fait, en utilisant des débits synthétiques, on risque fort de trouver des résultats... vérifiant les hypothèses sur lesquels les modèles sont construits. Les travaux de Beven et Hornberger (1982) illustrent bien ce point : pour étudier l'effet de la distribution spatiale des pluies sur la modélisation des débits, ces derniers ont tout d'abord essayé d'analyser des événements pluviométriques réels mesurés sur un petit bassin versant de l'Illinois, différant entre eux par la distribution spatiale de la pluie. Cette analyse ayant dû se faire sur un nombre assez limité d'événements, les tests statistiques ont montré que les différences n'étaient pas significatives. Pour cette raison, les auteurs ont eu recours à un grand nombre d'événements de pluie synthétiques, couplés à un modèle pluie-débit. Ils ont alors pu mettre en évidence une différence significative entre les hydrogrammes (synthétiques) correspondant à différentes distributions de pluie et ont conclu que c'était au niveau du « timing » de l'hydrogramme que l'influence de la distribution spatiale de la pluie se faisait le plus sentir. Quoique cette conclusion soit intéressante, l'approche utilisée est biaisée et il est fort possible que la différence « significative » mise en évidence par l'utilisation des événements synthétiques ne soit qu'un artefact introduit par le module de routage du modèle semi-distribué utilisé pour la simulation.

- (c) enfin, il est clair que l'approche (i) ne permet pas d'étudier l'impact d'un réseau pluviométrique *réel* sur la performance des modèles. Dans les réseaux réels, les incertitudes ne proviennent pas uniquement du nombre trop restreint de points d'échantillonnage, mais aussi de facteurs propres aux instruments et aux sites de mesure (Rodda, 1967), et il est important de savoir comment les modèles de bassin versant se comportent dans ces conditions.

Nous proposons, dans la section suivante, l'approche que nous avons développée pour évaluer empiriquement l'impact d'une connaissance imparfaite de la pluie sur le fonctionnement d'un modèle pluie-débit.

5.2 Etude empirique de l'impact d'une connaissance imparfaite de la pluie sur un échantillon de trois bassins versants

La méthode que nous avons utilisée a consisté à sélectionner trois bassins versants pour lesquels nous disposions d'un réseau pluviométrique très dense, qui permettait d'avoir une très bonne connaissance de la pluie journalière de bassin (nous parlerons plus loin de *pluie de bassin de référence*). Sur chaque bassin, nous avons sous-échantillonné ce réseau afin d'alimenter le modèle pluie-débit avec des données de qualité inférieure. Nous avons alors étudié le lien qui existait entre :

- la « qualité de représentation de la pluie » et les performances du modèle;
- la « qualité de représentation de la pluie » et les valeurs des paramètres du modèle.

Pour définir ce que nous entendons par « qualité de représentation de la pluie », nous introduisons en section 5.2.1 deux indices permettant de mesurer la distance entre une chronique de pluie « imparfaite » et une chronique de pluie de référence.

5.2.1 Présentation des indices GORE et BALANCE

Notre objectif est d'analyser le lien existant entre les performances d'un modèle pluie-débit et la représentativité de la pluie de bassin utilisée pour faire tourner le modèle. Nous avons besoin de définir un indice quantitatif, permettant d'estimer une distance entre la « vraie » pluie de bassin et la pluie fournie au modèle. Pour cela, nous avons besoin d'un réseau de pluviomètres suffisamment nombreux et bien répartis, afin de pouvoir définir, pour chaque jour i , par une combinaison linéaire simple, une précipitation « vraie » que l'on notera P_i (par la suite, on parlera plutôt d'une *pluie de bassin de référence* dans la mesure où la pluie « vraie » est impossible à connaître). Soit P_i^E la pluie de bassin du jour i estimée au moyen d'un sous-ensemble du réseau pluviométrique complet. Le premier indice proposé est une transposition, dans le domaine de la pluie, de l'indice bien connu de Nash et Sutcliffe (1970), calculé sur la racine carrée des valeurs. Cet indice que l'on appellera GORE (pour *Goodness Of Rainfall Estimation*), s'écrit :

$$GORE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\sqrt{P_i^E} - \sqrt{P_i})^2}{\sum_{i=1}^n (\sqrt{P_i} - \sqrt{\bar{P}})^2} \quad \text{Eq. 5.1}$$

(n est le nombre de pas de temps de l'étude)

Comme on le remarque dans l'Eq. 5.1, cet indice compare la somme du carré des erreurs de l'estimation de la pluie à la variance de la pluie de bassin de référence. Comme l'indice de Nash et Sutcliffe, l'indice GORE peut varier entre $-\infty$ et 1. Quand la pluie estimée P_i^E est identique pour chaque jour à la pluie de référence, l'indice GORE est égal à 1. Notons que la racine carrée est introduite pour réduire le poids des événements extrêmes au sein de l'indice global.

Le second indice proposé permet de quantifier la sur-ou sous-estimation de la pluie de référence par un sous-échantillon de postes pluviométriques. Cet indice compare la somme des pluies estimées à la somme des pluies de référence sur toute la période disponible. On le définit de la façon suivante :

$$BILAN = \frac{\sum_{i=1}^n P_i^E}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad \text{Eq. 5.2}$$

L'indice BILAN sera plus grand que 1 en cas de sur-estimation des pluies, plus petit que 1 en cas de sous-estimation.

Ces deux indices très simples permettent de caractériser à la fois la qualité de l'estimation du volume total des pluies et de sa distribution temporelle. Ces deux

aspects sont essentiels pour un modèle hydrologique, qui se comporte en filtre, et convertit les entrées de pluie en modifiant leur distribution temporelle et leur volume au moyen de ses fonctions de transfert et de production.

5.2.2 Présentation des bassins versants utilisés

Dans cette partie, nous abandonnons provisoirement notre échantillon de bassins forestiers. En effet, aucun d'entre eux ne disposait d'un réseau pluviométrique suffisamment dense pour se prêter à cette analyse. Nous nous intéressons à trois bassins d'échelles différentes, pour lesquels nous disposons d'un réseau pluviométrique très complet :

- L'Yonne à Courlon (10 700 km²) ;
- Le Serein à Chablis (1 120 km²) ;
- Le Réal Collobrier au Pont de Fer (70 km²).

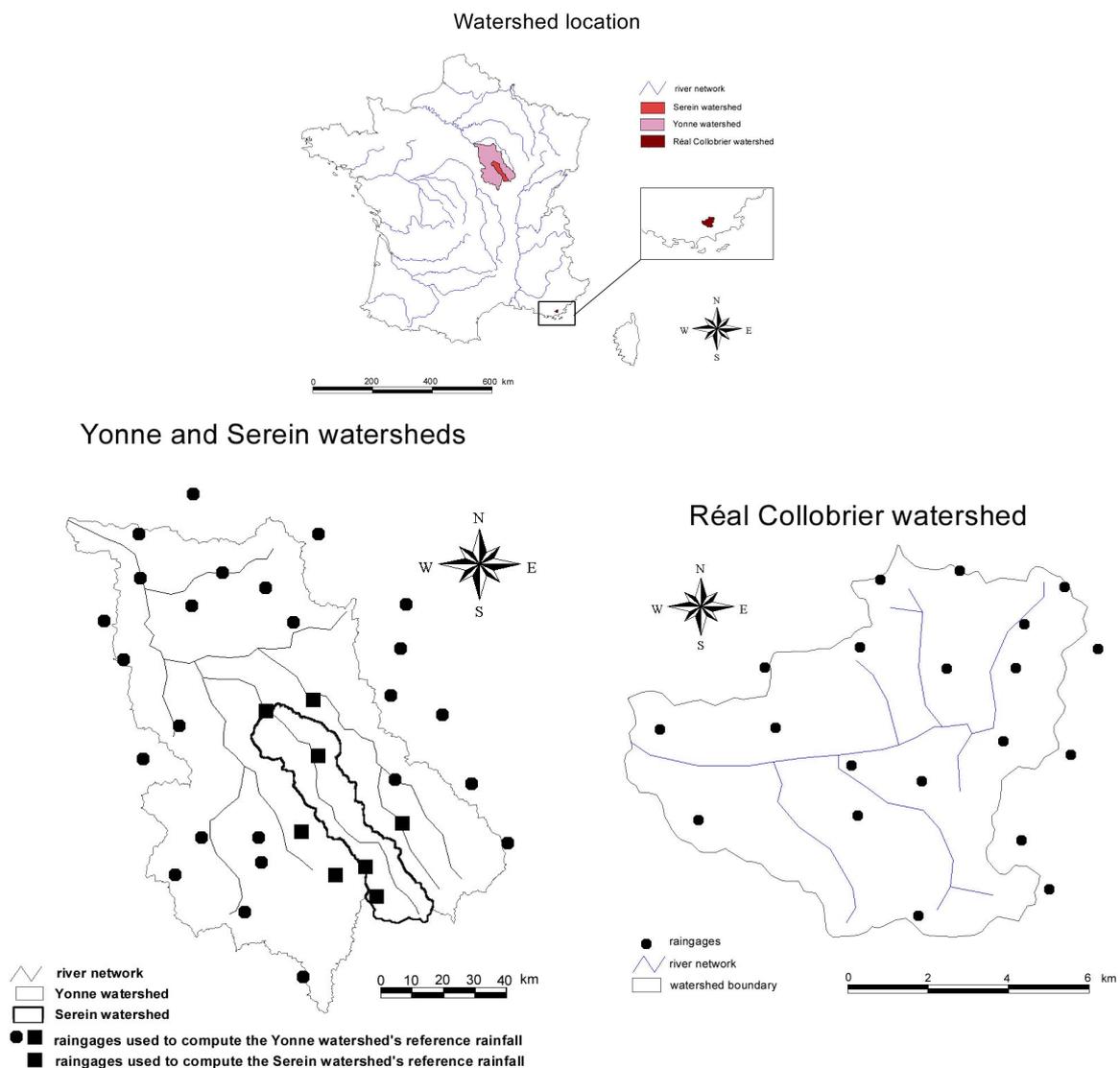


Figure 5.1 : situation des bassins versants tests et de leur réseau pluviométrique

Pour le bassin entier de l'Yonne (et son sous-bassin le Serein), on dispose de données journalières de pluie sur 33 postes uniformément répartis sur la période 1980-1989 (Figure 5.1). Pour le Réal Collobrier, on dispose de 20 postes pluviométriques uniformément répartis sur la période 1973-1982. L'intérêt de ces trois bassins réside à la fois :

- dans la possibilité de définir une pluie de bassin de référence aussi proche que possible de la « vraie » pluie ;
- dans la gamme d'échelles spatiales (surfaces de 70, 1120 et 10700 km²) ;
- dans la variété des régimes climatiques (le climat de l'Yonne est tempéré et humide, celui du Réal Collobrier est Méditerranéen humide, caractérisé par des orages beaucoup plus intenses).

Les caractéristiques des trois bassins utilisés ici sont regroupées en Tableau 5.1.

Tableau 5.1 : caractéristiques des trois bassins utilisés pour l'étude de l'impact d'une connaissance imparfaite de la pluie sur la performance d'un modèle pluie-débit

Bassin Versant	Surface (km ²)	Période couverte par les données journalières de pluie et de débit	Nombre total de pluviomètres disponibles	Nombre de pluviomètres utilisables pour définir la pluie de bassin de référence	Climat	Pluie moyenne annuelle (mm)	Débit moyen annuel (mm)
Yonne	10 700	1980-1989	33	33	Tempéré océanique	850	330
Serein	1 120	1980-1989	33	7	Tempéré océanique	900	260
Réal Collobrier	70	1973-1982	20	20	Méditerranéen humide	1100	340

5.2.3 Plan d'expérience

Dans ce chapitre, nous travaillons avec une version du modèle GR à trois paramètres libres (GR3J)¹. La différence majeure entre GR3J et GR4J (que nous avons présenté au chapitre 4) tient au fait que le réservoir de production dont la capacité est fixée dans GR3J est optimisée dans GR4J. Pour plus de détails, se référer à l'annexe II.2.

Pour étudier la relation entre la qualité de l'estimation de la pluie de bassin et la performance du modèle GR3J pour la simulation de l'écoulement sur l'Yonne, le

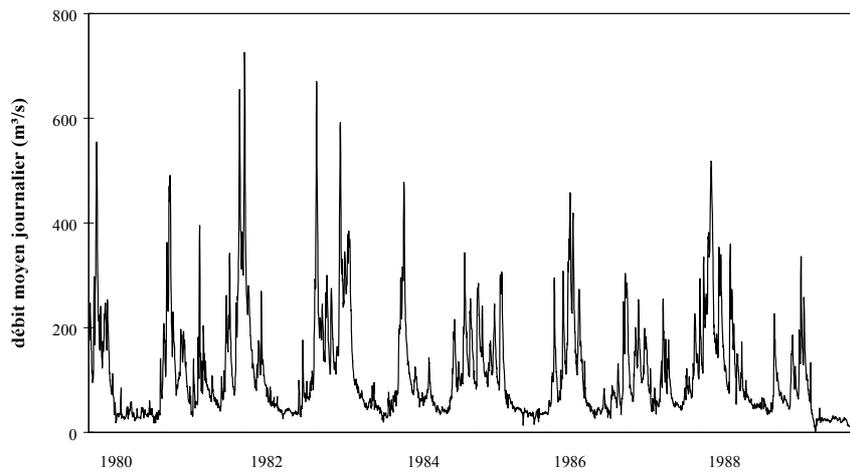
¹ Même si les performances moyennes de GR4J sont supérieures à celles de GR3J, l'utilisation de GR3J à la place de GR4J n'affecte pas la valeur et la portée des résultats. Nous avons pu le vérifier sur des tests où l'on a laissé la capacité du réservoir de production libre.

Serein et le Réal Collobrier, on a généré aléatoirement des sous ensembles de postes comme suit :

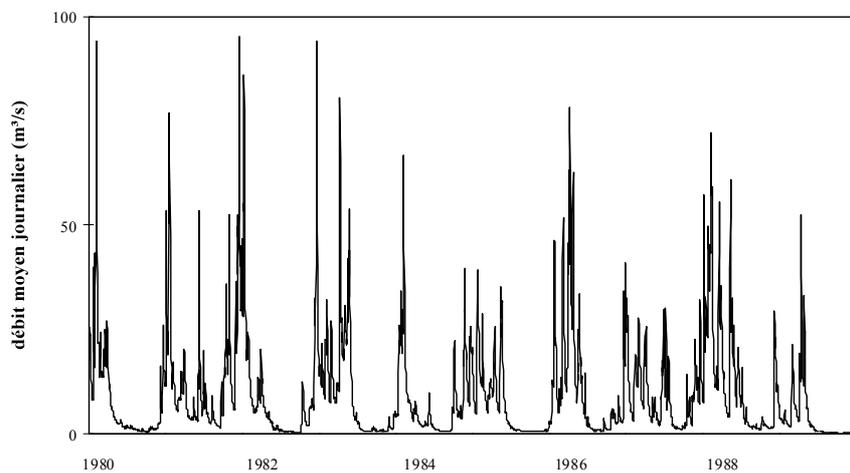
- **Yonne** : 1867 sous-ensembles de k postes choisis parmi 33 ont été générés : pour k variant de 2 à 31, on a tiré au hasard 60 combinaisons ; pour k égal à 1 ou 32, on avait seulement 33 combinaisons possibles ; et enfin, il restait une combinaison regroupant les 33 postes ($1867 = 30 \times 60 + 2 \times 33 + 1$). La pluie de bassin est calculée en faisant la moyenne arithmétique des postes de l'échantillon. La pluie de bassin de référence est calculée en faisant la moyenne arithmétique des 33 postes disponibles. GR3J a été testé à la fois en calage et en contrôle suivant la procédure de l'échantillon partagé (*split sample test*, Klemeš, 1986) : le modèle est calé successivement sur chacune des 1867 combinaisons, sur deux périodes de 5 ans (1980-84 et 1985-89) ; ensuite les paramètres obtenus sur une période sont utilisés en mode de contrôle sur l'autre période.
- **Serein** : on a utilisé les mêmes 1867 sous-ensembles que pour l'Yonne, la seule différence étant dans le calcul de l'indice GORE, où la pluie de référence n'était plus calculée qu'à partir des 7 postes situés sur le bassin où à proximité immédiate (voir Figure 5.1). Pour le Serein, on avait donc la possibilité de simuler des conditions beaucoup plus défavorables d'estimation de la pluie¹.
- **Réal Collobrier** : nous avons utilisé la même procédure que pour l'Yonne et le Serein pour simuler 1061 sous-ensembles de k postes pris parmi 20 ($1061 = 60 \times 17 + 2 \times 20 + 1$). Dans le calcul de l'indice GORE, on a utilisé la moyenne arithmétique des 20 postes pour le calcul de la pluie de bassin de référence.

Les hydrogrammes de l'Yonne, du Serein et du Réal Collobrier pour la période d'étude sont présentés en Figure 5.2. Dans les sections 5.2.4 et 5.2.5, nous analysons la relation entre estimation de la pluie, performance du modèle et valeurs des paramètres.

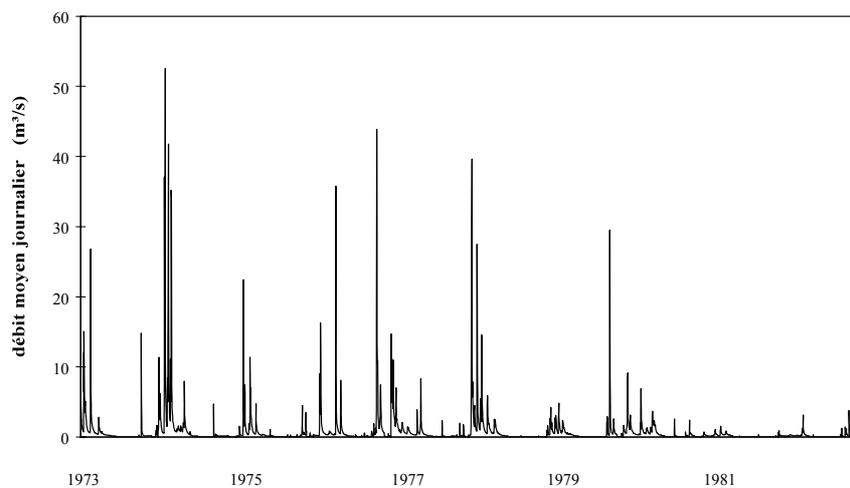
¹ C'est à dire, des conditions où l'on utilise des postes très éloignés, potentiellement beaucoup moins représentatifs de la pluie de bassin.



(a) Hydrogramme journalier de l'Yonne à Courlon (1980-1989)



(b) Hydrogramme journalier du Serein à Chablis (1980-1989)



(c) Hydrogramme journalier du Réal Collobrier au Pont de Fer (1973-1982)

Figure 5.2 : hydrogrammes journaliers de l'Yonne, du Serein et du Réal Collobrier sur la période d'étude

5.2.4 Sensibilité des performances du modèle à la qualité de l'estimation des pluies

La Figure 5.3 présente les résultats de tous les calages fait avec GR3J sur l'Yonne, le Serein et le Réal Collobrier : sur l'axe des abscisses on a porté les indices GORE ou BILAN, sur l'axe des ordonnées on a porté le critère de performance du modèle au calage¹. On y observe plusieurs comportements intéressants :

- d'une part, les performances ont tendance à croître avec l'indice GORE. C'est un résultat logique ;
- de la même façon, les performances sont maximales lorsque l'indice BILAN est proche de 1. Cependant, on voit également que la condition d'une bonne estimation du volume total des pluies est nécessaire mais pas suffisante ;
- on observe deux nuages légèrement distincts pour le Réal Collobrier et le Serein, alors qu'il n'y en a qu'un pour l'Yonne : cela provient du fait que deux périodes de calage sont représentées sur la figure, et que la performance maximale du modèle dépend aussi de la période de calage ;
- enfin, on observe un comportement apparemment contradictoire : alors que les performances du modèle croissent globalement avec l'indice GORE, on peut obtenir d'assez bonnes performances même avec une valeur de GORE relativement faible. Pour l'Yonne, on peut citer en Figure 5.3 un point à 0.74 de GORE (qui correspond à une combinaison ne comprenant qu'un poste pluviométrique) mais qui obtient un critère de Nash de 81% au calage². Cependant, il faut se rappeler qu'en hydrologie, l'objectif est rarement d'obtenir un bon calage, mais plutôt d'éviter de manière systématique les mauvais calages. C'est clairement la courbe enveloppe inférieure du nuage de point qu'il faut considérer, on voit alors que l'amélioration de l'estimation des pluies permet de réduire la variabilité des performances du modèle.

¹ On aurait pu présenter de la même façon les résultats au contrôle, les tendances observées sont similaires.

² C'est d'autant plus impressionnant que le bassin versant de l'Yonne fait tout de même 10 700 km² !

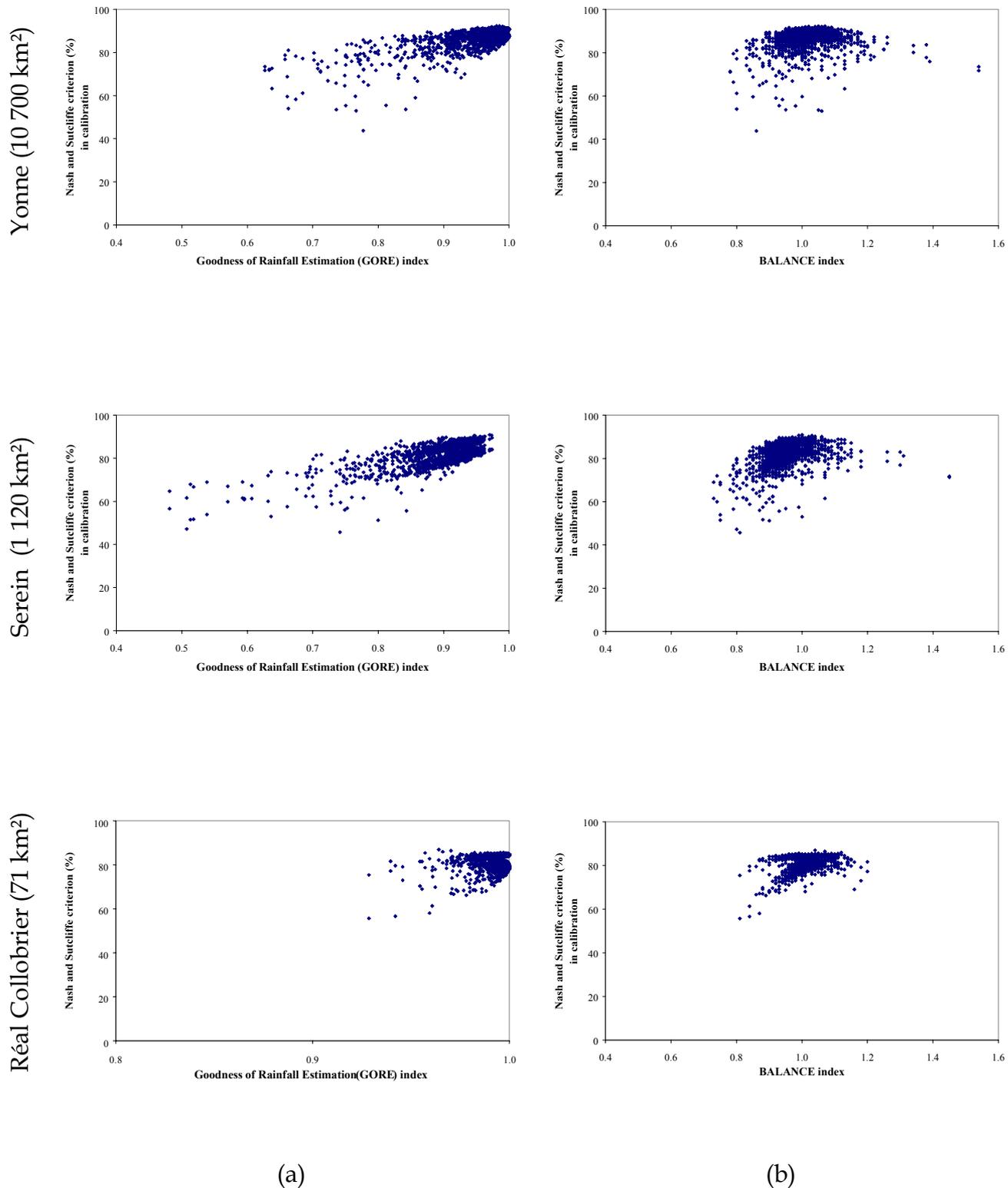


Figure 5.3 : Évolution de la performance au calage de GR3J en fonction des indices GORE (a) et BILAN (b) pour trois bassins versants (calage sur deux périodes : 1980-84 et 1985-1989 pour l'Yonne et le Serein, 1973-77 et 1978-82 pour le Réal Collobrier).

5.2.5 Sensibilité des paramètres du modèle à la qualité de l'estimation des pluies

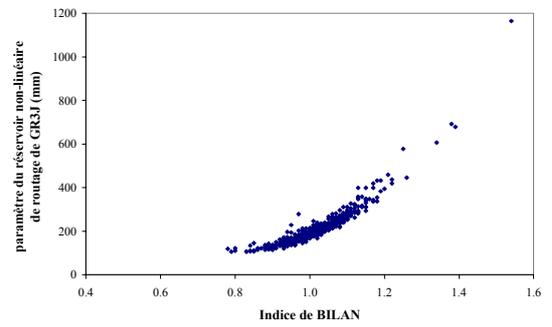
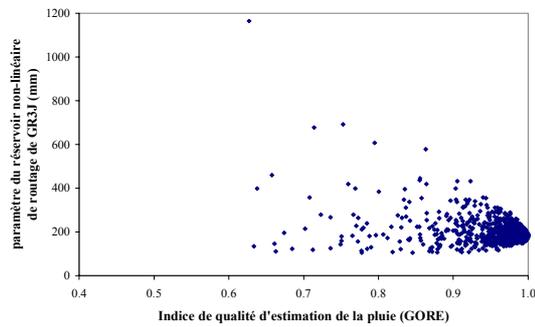
Les Figures 5.4 à 5.6 présentent le comportement des paramètres de GR3J, qui ont été calés avec les données de chacun des sous ensembles de pluviomètres (remarque : pour rendre les figures plus claires, on n'a porté les calages que pour l'une des périodes considérées). La partie gauche des figures, où l'on a représenté les valeurs des paramètres en fonction de l'indice GORE, montre pour chaque paramètre et pour les trois bassins versants, un nuage en pointe de flèche, qui traduit le fait que la variabilité des paramètres estimés diminue au fur et à mesure que les pluies utilisées en entrée deviennent proches de la pluie de référence. Notons que ce comportement, qui paraît tout à fait logique, ne constitue pas nécessairement la norme pour un modèle pluie-débit (voir en Annexe III.1 une comparaison avec d'autres modèles pluie-débit).

La partie droite des figures, où l'on a représenté les valeurs des paramètres en fonction de l'indice BILAN, montre que le modèle peut s'adapter à la sur- et à la sous-estimation de la pluie en modulant chacun de ses paramètres. Le paramètre de l'hydrogramme de routage est le plus indépendant : il ne varie pas en fonction du BILAN sur le Réal Collobrier, varie un peu sur le Serein, encore un peu plus sur l'Yonne. Il est possible que cette réaction soit liée à la taille du bassin, et à la variabilité temporelle des précipitations, qui est très faible pour un petit bassin, potentiellement plus importante pour un grand bassin.

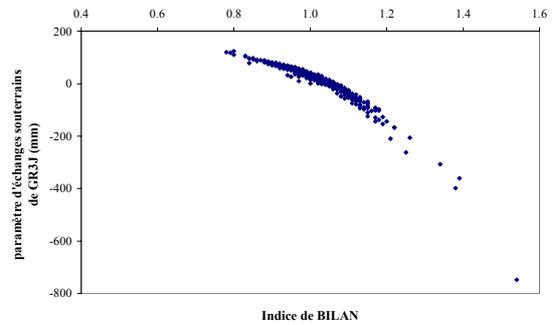
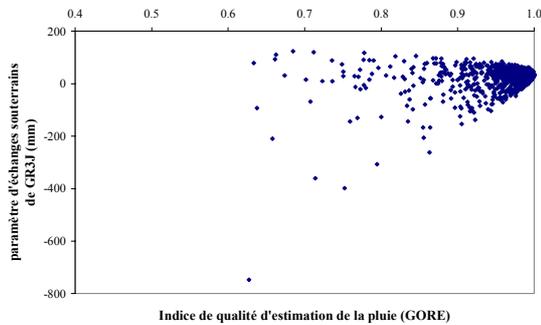
Toujours à propos du paramètre de l'hydrogramme unitaire de routage, notons que l'on détecte en Figure 5.4 et dans une moindre mesure en Figure 5.5, une zone d'exclusion autour d'une valeur entière (4 jours), qui peut s'expliquer par la façon dont l'hydrogramme unitaire (qui transfère notamment la composante rapide de l'écoulement) est discrétisé, pour fonctionner au pas de temps du modèle : une valeur entière aura tendance à générer des hydrogrammes de crue dont le pic est également réparti sur deux pas de temps (deux jours), ce qui est rarement le cas.

En conclusion, il semble bien que GR3J ait, dans une certaine mesure, la possibilité de s'adapter à des défauts d'estimation de la pluie, et de compenser ainsi la moindre qualité des données. La Figure 5.3 doit cependant nous rappeler que le modèle paiera toujours la mauvaise qualité des données de pluie par une moindre stabilité de ses performances, au calage comme au contrôle.

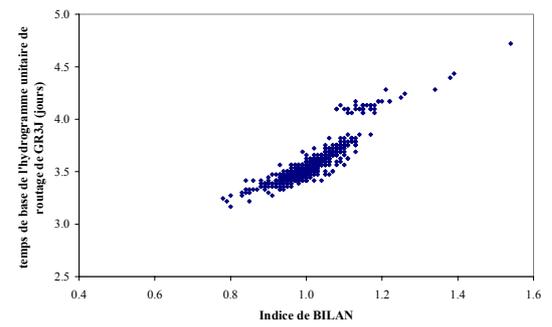
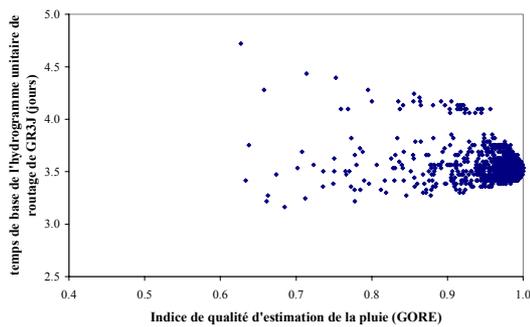
X1 : paramètre du réservoir de routage (mm)



X3 : paramètre d'échanges souterrains



X4 : paramètre de l'hydrogramme de routage (jours)

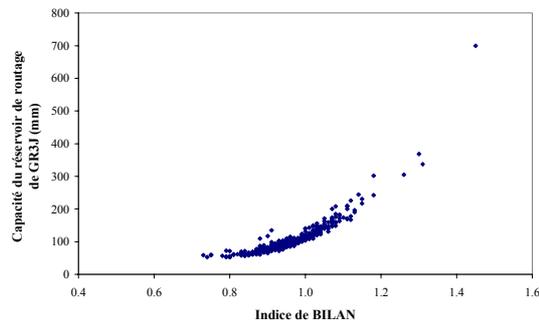
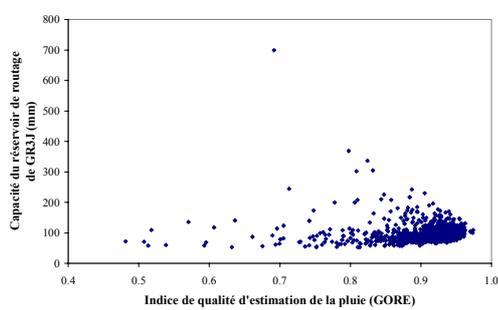


(a)

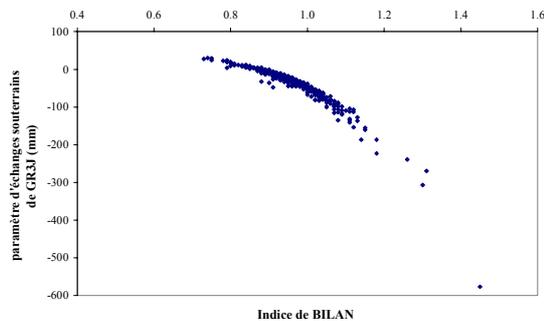
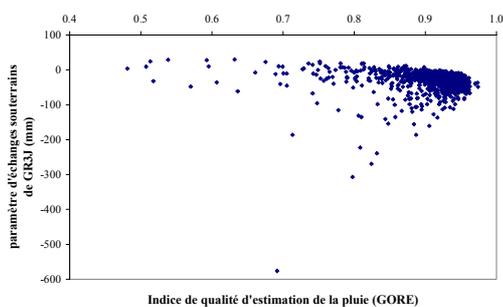
(b)

Figure 5.4 : relation entre la qualité d'estimation de la pluie (mesurée par les indices GORE (a) et BILAN (b)) et les valeurs des trois paramètres de GR3J. Résultats obtenus sur l'Yonne, calage sur la période 1980-84.

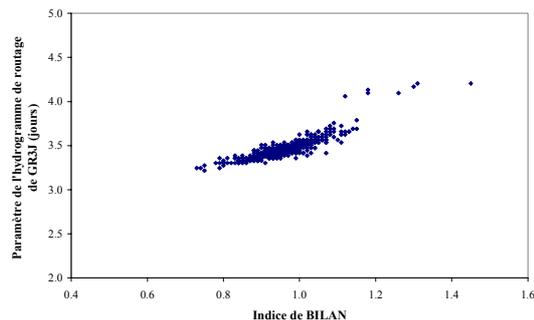
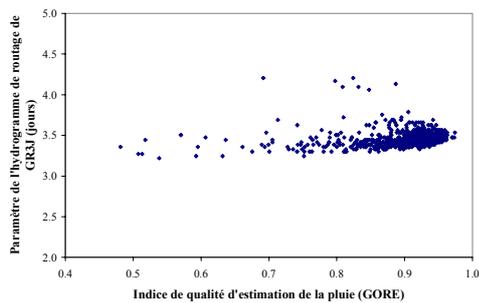
X1 : paramètre du réservoir de routage (mm)



X3 : paramètre d'échanges souterrains



X4 : paramètre de l'hydrogramme de routage (jours)

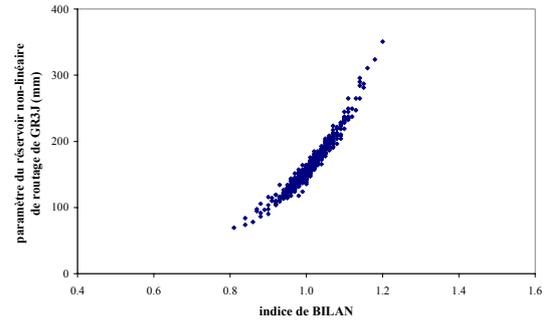
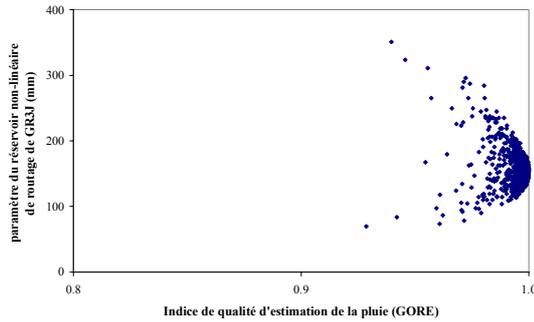


(a)

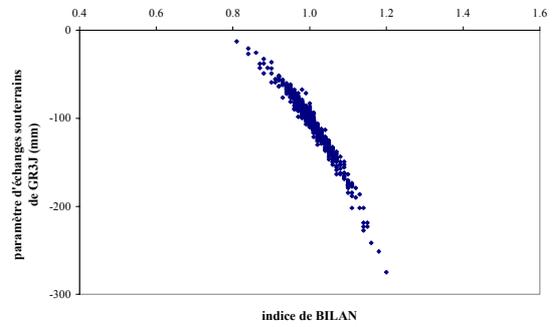
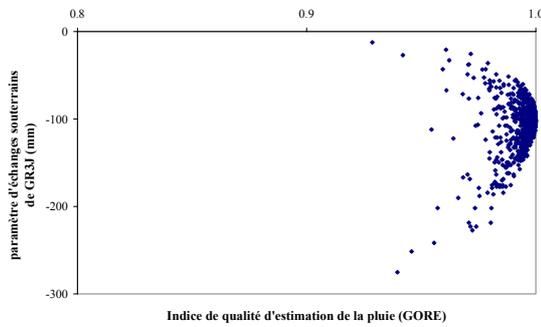
(b)

Figure 5.5 : relation entre la qualité d'estimation de la pluie (mesurée par les indices GORE (a) et BILAN (b)) et les valeurs des trois paramètres de GR3J. Résultats obtenus sur le Serein, calage sur la période 1980-84.

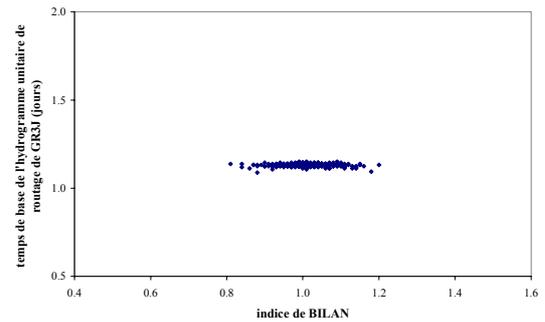
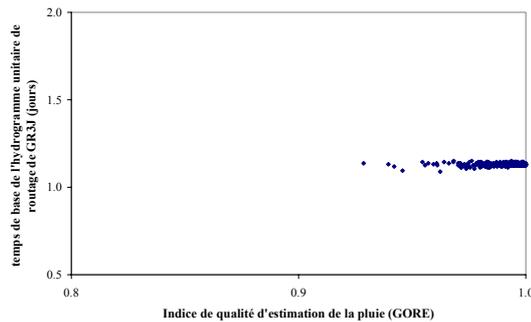
X1 : paramètre du réservoir de routage (mm)



X3 : paramètre d'échanges souterrains



X4 : paramètre de l'hydrogramme de routage (jours)



(a)

(b)

Figure 5.6 : relation entre la qualité d'estimation de la pluie (mesurée par les indices GORE (a) et BILAN (b)) et les valeurs des trois paramètres de GR3J. Résultats obtenus sur le Réal Collobrier, calage sur la période 1973-77.

5.3 Que faire en présence d'une estimation biaisée de la pluie de bassin ? Méthodes de correction globale de la pluie.

Lorsque nous sommes confrontés à des bassins moins bien connus au plan pluviométrique que ne pouvaient l'être l'Yonne, le Serein et le Réal Collobrier, il peut se faire que les postes donnent une estimation nettement sur- ou sous-évaluée de la pluie. Cela est bien sûr très délicat à détecter, en dehors de situations caricaturales, là où par exemple le débit annuel est supérieur à la pluie annuelle, alors qu'aucun transfert souterrain ne semble présent.

Dans notre échantillon du Massif central (63 bassins au total), un certain nombre de bassins versants posait des problèmes pour l'estimation de la pluie de bassin (notamment dans les Cévennes, zone très arrosée avec une forte variabilité spatiale des pluies). Nous avons donc cherché à mettre en place une procédure aussi objective que possible pour calculer un coefficient correcteur de la pluie de bassin.

Certains modèles pluie-débit proposent de caler un coefficient correcteur de la pluie (IHACRES par exemple, voir Littlewood et al., 1997). Nous n'avons pas cherché à optimiser un tel coefficient directement avec GR4J¹, car nous considérons que cela présentait un très grand risque, en raison des effets que cela aurait sur l'incertitude d'estimation des paramètres. De plus, nous pensons que le calage ne doit s'appliquer qu'aux variables d'état du modèle, non pas aux données d'entrée.

Nous proposons donc dans ce qui suit deux méthodes différentes de calcul, l'une utilisant des cartes de pluviométrie moyenne fournies par Météo France, l'autre utilisant une modélisation pluie-débit à un pas de temps très différent de celui de GR4J (le pas de temps annuel). Nous comparons ensuite ces deux méthodes sur le plan de l'amélioration des performances de GR4J au contrôle.

5.3.1 Utilisation de cartes de la pluviométrie moyenne interannuelle

Dans la mesure où des cartes de pluviométrie moyenne sont disponibles, il est très simple de calculer un coefficient correcteur pour la pluie de bassin : d'une part, on peut calculer la moyenne interannuelle de la pluie de bassin en faisant la moyenne des valeurs observées sur la carte. D'autre part, on peut faire la moyenne des pluies de bassin calculées au moyen des pluviomètres disponibles pour le bassin. Le ratio de ces deux moyennes donne le coefficient correcteur recherché.

En raison de la petite taille de nos bassins et du relief assez accidenté du Massif central, une telle méthode exige cependant de disposer de cartes suffisamment précises. Il faut aussi s'intéresser à la méthode qui a été utilisée pour la production de la carte, notamment savoir si des gradients altitudinaux régionaux ont pu être intégrés, pour prendre en compte le relief, car c'est souvent la sous-représentation

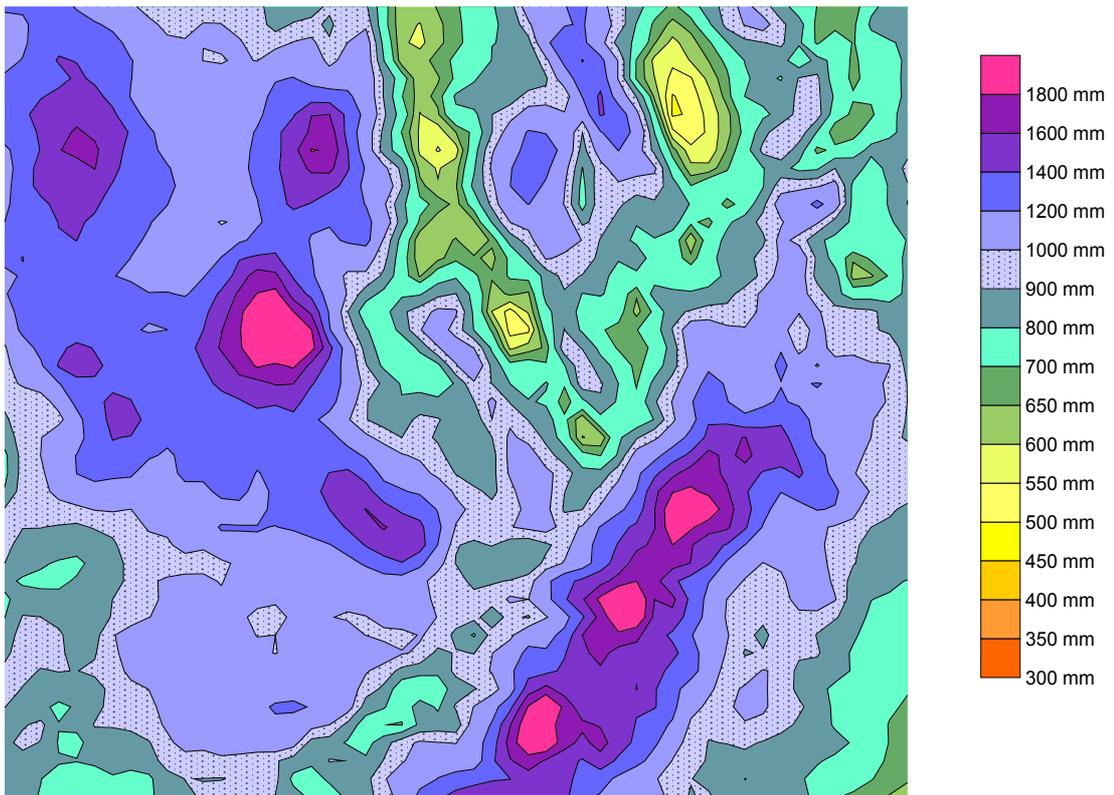
¹ Nous abandonnons désormais la version de GR à 3 paramètres et reprenons le modèle GR4J.

Chapitre 5 : Impact de la mauvaise connaissance de la pluie

(ou l'absence) de pluviomètres d'altitude qui est à la base de la mauvaise représentativité du réseau de pluviomètres utilisé.

Nous avons pu utiliser une carte numérique, fournissant les moyennes pluviométriques de la période (1961-1990) avec une maille d'1 km. Cette carte nous a été fournie gracieusement par B. Rambaldelli à Météo France, elle a été produite par la méthode Aurelhy (Benichou et Le Breton, 1987), qui prend en compte le relief pour la reconstitution du champs des précipitation (c'est à dire l'altitude mais aussi un effet d'encaissement, l'exposition Ouest/Est ou Nord/Sud et l'effet de col) (Figure 5.7).

CHAMP DE PRECIPITATIONS



ISOHYETES (DE 100 en 100 mm) SUPERPOSEES AU RELIEF

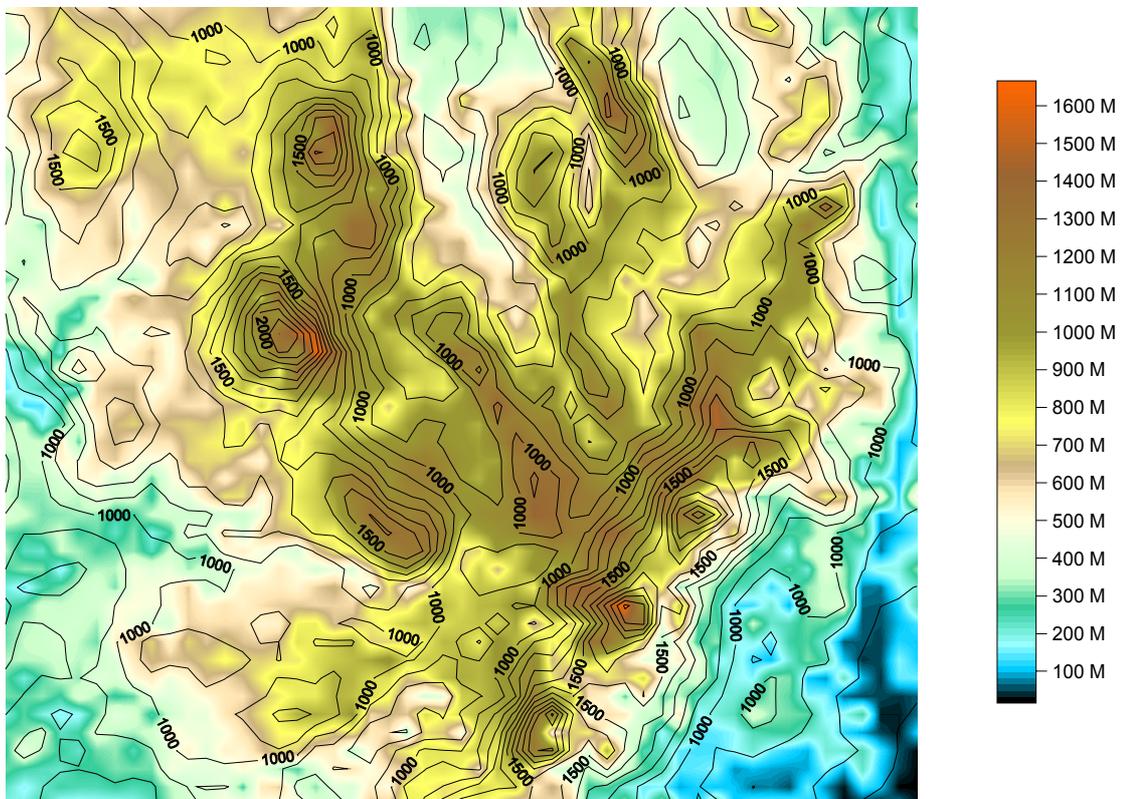


Figure 5.7 : relief et moyennes annuelles 1961-1990 des précipitations dans le Massif central (source : Météo France)

Avec la grille kilométrique des moyennes annuelles, nous avons pu également calculer des éléments caractérisant la variabilité spatiale de la pluviométrie et du relief au sein de chaque bassin versant. Les résultats sont présentés en Annexe III.2 (caractéristiques globales de la pluie sur les bassins, puis résultats ayant permis le calcul du coefficient correcteur de la pluie de bassin). Cette approche a bien sûr des imperfections :

- avant tout, elle présente le problème de rester très globale : elle ne prend pas en compte l'intensité des pluies - on aurait pu par exemple corriger uniquement les événements au-dessus d'un certain seuil, comme le propose Gentien-Baudry (1999) - et elle n'offre pas non plus de prise en compte individualisée de chaque jour.
- elle ne prend pas en compte la variabilité annuelle de la pluie. Mais nous pensons qu'étant donné les modes d'extrapolation de l'information pluviométrique choisis, seule une moyenne interannuelle a une signification pour des bassins aussi petits que les nôtres ;
- idéalement, il aurait été souhaitable que les moyennes calculées sur les postes pluviométriques journaliers couvrent la même période que la carte des pluies (soit 1961-1990). Cela n'était pas toujours possible, mais l'Annexe III.2, qui donne la longueur des séries ayant servi à l'établissement des moyennes des postes pluviométriques journaliers, permet de vérifier que les durées sont de 32 ans en moyenne (comprises entre 12 et 48 ans).

La méthode a été testée sur deux périodes de 4 années (1 année d'initialisation et 3 années de calage) pour chacun des bassins de notre échantillon. Nous présentons en section 5.3.3 les résultats de GR4J en terme de performance au contrôle.

5.3.2 Utilisation d'un modèle pluie-débit fonctionnant à un pas de temps plus large

Dans la correction de pluie, l'un des principaux problèmes tient au fait que l'on n'a le plus souvent pas d'information précise disponible sur la distribution spatiale de la pluie sur le bassin versant. Pourtant, le bassin versant étant un intégrateur de la pluie qui s'est abattue sur lui, l'écoulement à son exutoire contient une grande partie de l'information pluie. Mais comme nous l'avons répété précédemment, intégrer au modèle un coefficient de correction de pluie présente de nombreux dangers numériques.

Une façon de contourner ce danger consiste à utiliser pour l'optimisation du coefficient un modèle pluie-débit fonctionnant à un autre pas de temps. Nous avons utilisé le modèle GR1A, modèle de bilan hydrique fonctionnant au pas de temps annuel (Bouabdallah, 1997). GR1A ne comportait à l'origine qu'un paramètre à caler, nous lui avons ajouté un second correspondant à une correction de pluie. Le modèle annuel a alors été calé sur la totalité de la période disponible, et on en a déduit les coefficients correcteurs de la pluie utilisés pour la modélisation au pas de temps journalier. Comme la méthode de calage avait pour effet de créer des « paliers », on a effectué un lissage des coefficients correcteurs comme indiqué sur la Figure 5.8.

Notons que le point extrême correspondant à $P-Q = -592$ correspond au bassin 44, pour lequel on a un problème de définition de la taille exacte du bassin versant plutôt que de définition de la pluie (bassin karstique). Pour ce bassin, c'est plutôt une correction de la surface qui est appropriée.

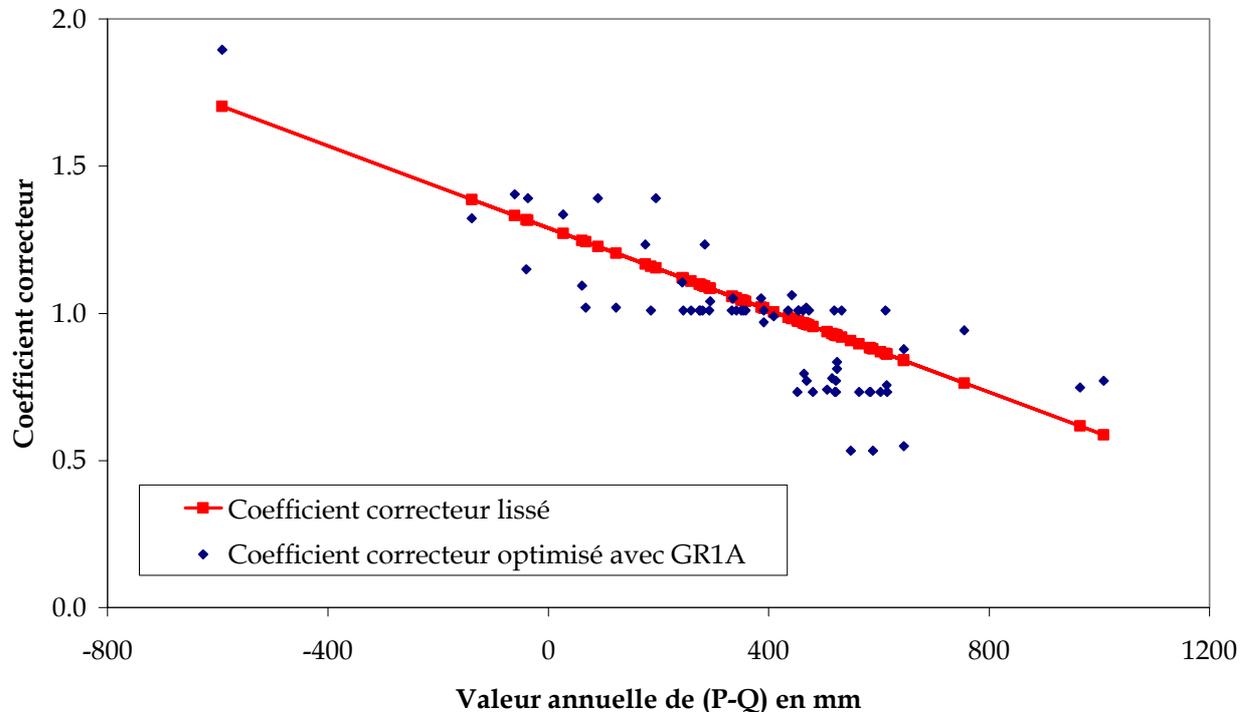


Figure 5.8 : résultats de l'optimisation d'un coefficient correcteur de la pluie avec GR1A et du calcul d'un coefficient lissé

Les coefficients correcteurs « bruts » et « lissés » sont présentés en Annexe III.2. Les distributions des coefficients correcteurs sont présentées en Figure 5.9.

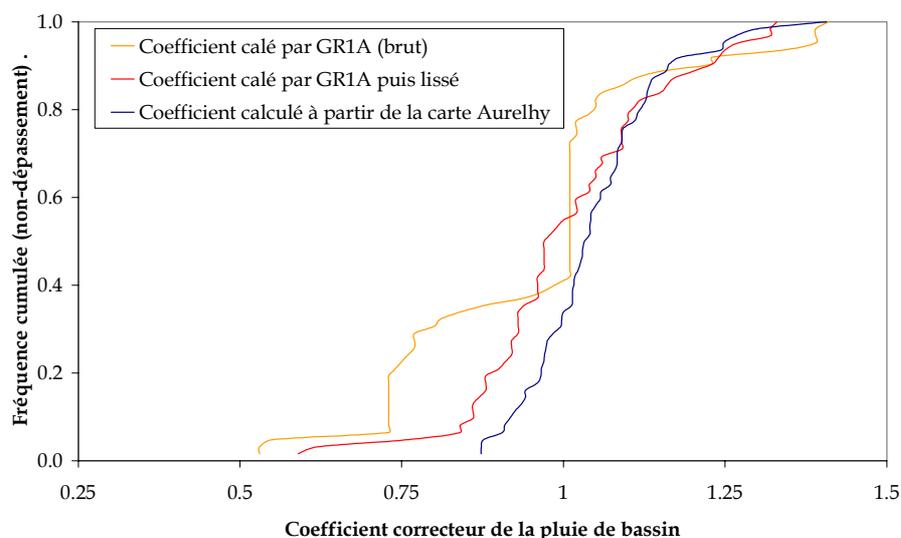


Figure 5.9 : distribution des coefficients multiplicatifs correcteurs de la pluie calculée par les trois méthodes présentées

5.3.3 Comparaison des méthodes en termes de performance d'un modèle pluie-débit journalier

A présent, nous comparons les deux méthodes de correction en termes de performances du modèle pluie-débit journalier GR4J : pour cela, nous avons fait tourner GR4J au calage sur l'échantillon de 63 bassins (mais en omettant les bassins 44 et 45 car ils posent un problème de correction de surface en plus de la correction de pluie). Pour chaque bassin, on a pris en compte deux périodes contiguës de trois ans, afin de pouvoir étudier la distribution des résultats au contrôle. Les périodes de calage-contrôle étant contiguës et courtes, on a considéré que le comportement des bassins était stationnaire sur les six ans.

Afin de disposer d'éléments de comparaison, nous avons pris en compte au total six cas :

- un cas sans aucune correction de la pluie;
- deux cas "symétriques" avec des corrections fortes (2/3 et 3/2) identiques pour l'ensemble des bassins;
- deux cas de correction utilisant les coefficients calés au moyen d'un modèle fonctionnant au pas de temps annuel (voir section 5.3.2) ;
- un cas où le coefficient a été calculé au moyen d'une carte des normales pluviométriques fournie par Météo France (voir section 5.3.1).

Nous avons également cherché à savoir si la correction de pluie pouvait se faire sentir différemment sur les différentes composantes du régime hydrologique. Dans ce but, nous présentons les résultats au contrôle en utilisant deux modes de calcul du critère de performance du modèle : dans un cas (Figure 5.10), le critère est calculé sur la racine des débits, ce qui donne une image équilibrée du comportement du modèle sur l'ensemble de la gamme des débits; dans un second cas (Figure 5.11), le critère est calculé sur les débits, et les fortes valeurs (les crues) ont donc un poids relatif plus important.

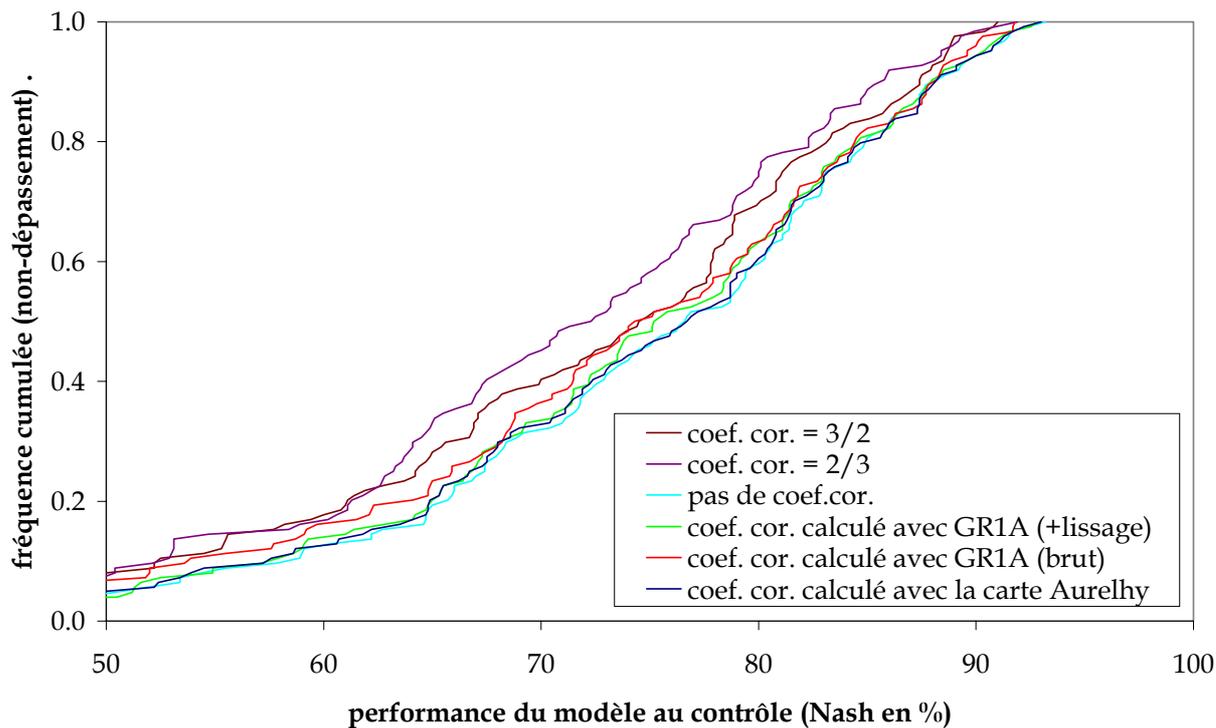


Figure 5.10 : distribution des résultats de GR4J au contrôle selon les modalités de correction des pluies utilisées (Nash calculé sur les racines des débits, bassins 44 et 45 omis)

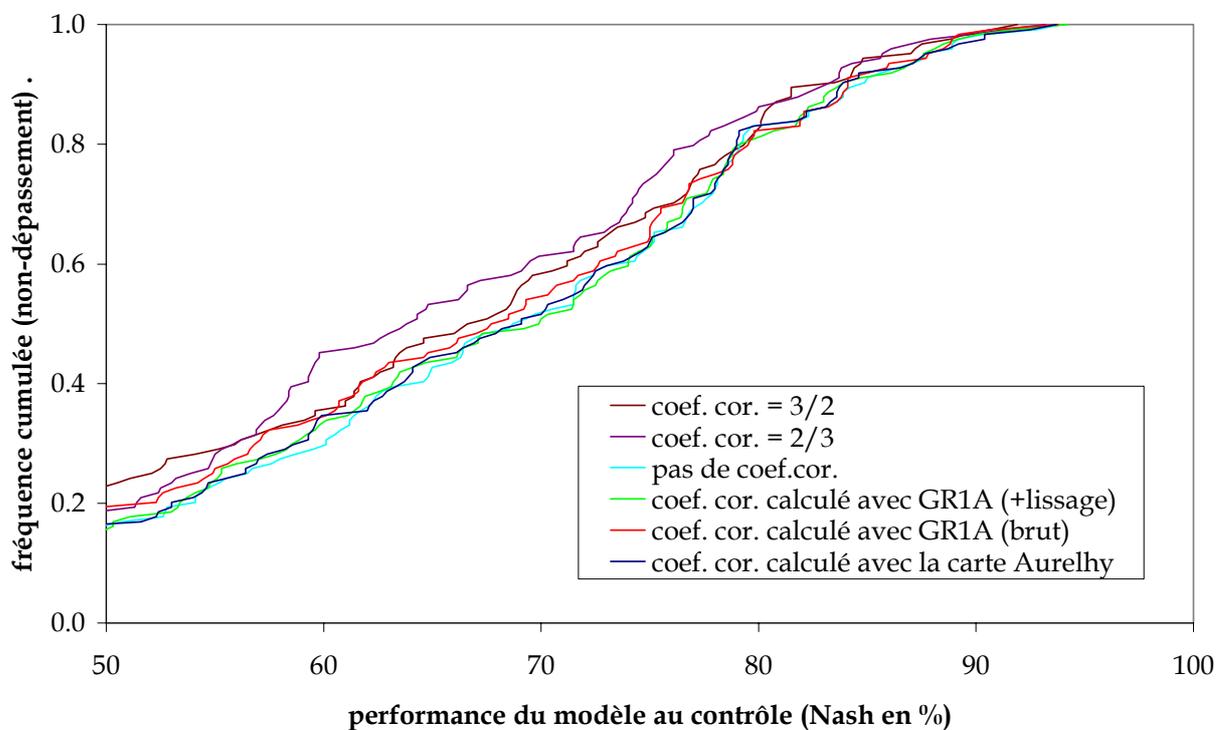


Figure 5.11 : distribution des résultats de GR4J au contrôle selon les modalités de correction des pluies utilisées (Nash calculé sur les débits, bassins 44 et 45 omis)

La Figure 5.10 et la Figure 5.11 montrent clairement que l'application des coefficients correcteurs arbitraires (2/3 et 3/2), ainsi que l'utilisation du coefficient correcteur "brut" issu de GR1A entraînent une dégradation de la performance du modèle.

Si l'on cherche à départager les deux méthodes restantes pour le calcul d'un coefficient correcteur, on peut observer qu'elles sont très proches, mais que la méthode cartographique semble un peu supérieure sur les débits moyens (Figure 5.10). Cependant, le résultat le plus surprenant est bien que l'on n'arrive pas à différencier les résultats obtenus sans correction des résultats obtenus avec la meilleure des méthodes de correction (fondée sur la cartographie Aurelhy). Deux explications sont envisageables :

- soit, GR4J arrive par ses propres moyens (notamment au travers de sa fonction d'échanges souterrains) à compenser une sur- ou sous-estimation systématique de la pluie;
- soit, une correction simple telle que nous l'avons effectuée n'est pas pertinente hydrologiquement : peut-être faudrait-il pouvoir faire porter cette correction sur certaines gammes de pluies uniquement.

Pour essayer de comprendre ce qui se passait, nous avons cherché :

- d'une part, à analyser comment les paramètres calés du modèle réagissaient aux différentes méthodes de correction ;
- d'autre part, nous avons comparé le comportement de GR4J à celui d'un autre modèle pluie-débit .

5.3.4 Impact du mode de correction de la pluie sur les paramètres de GR4J

De la Figure 5.12 à la Figure 5.15, nous présentons les distributions des paramètres de GR4J, obtenues sur l'échantillon de 63 bassins versants¹ selon quatre modalités de correction de la pluie : on a retenu les deux corrections arbitraires de 2/3 et de 3/2, la correction à partir de la carte des normales pluviométriques (méthode Aurelhy) et l'absence de correction.

Paramètres de production

- Pour le paramètre (X3) de la fonction d'échange, on observe naturellement que le modèle tente de compenser la surestimation systématique de la pluie (coefficient 1.5) par une perte (X3<0), la sous-estimation systématique (coefficient 0.67) par un gain. Par rapport à l'absence de correction, la correction « Aurelhy » produit une distribution « redressée », avec un moindre besoin du modèle de simuler des apports (X3>0). Cela se comprend dans la mesure où le manque de postes en altitude sur une grande partie des bassins nous permet de suspecter une tendance à la sous-estimation des pluies moyennes de bassin.

¹ Les bassins 44 et 45 ne sont toujours pas pris en compte.

- Pour la capacité du réservoir sol (X2), on peut à nouveau interpréter les deux cas extrêmes : le modèle s'adapte à une sous-estimation systématique des pluies par un réservoir sol plus petit, et à une sur-estimation par un réservoir plus grand. Le modèle peut donc ainsi garder un taux de remplissage raisonnable, lui permettant de calculer des rendements de pluie raisonnables et amortir les arrivées excessives (ou insuffisantes) d'eau. Il y a peu de différences dans les distributions de X2 entre correction et absence de correction, mais comme pour X3, la distribution correspondant à l'absence de correction est décalée vers la courbe correspondant aux sous-estimations.

Paramètres de transfert

On pourrait s'attendre a priori à ce que les paramètres de transfert ne soient pas affectés par un biais systématique sur les pluies. De façon surprenante, ce n'est le cas que pour l'un des paramètres (X4) :

- Pour le délai (X4) : il y a très peu de différences entre les 4 distributions. On peut néanmoins remarquer que le modèle s'adapte à une sous-estimation systématique en accélérant légèrement les transferts et que, pour la surestimation, il a tendance à les ralentir. Cela s'explique facilement par une plus grande difficulté à rendre les pics de crue dans ces deux cas extrêmes. Le modèle joue alors sur le temps de transfert pour réduire les écarts et améliorer le critère de calage.
- Pour la capacité du réservoir de routage (X1), on observe un comportement similaire à X3 et X2. Une raison possible pour cette similarité de comportement peut être la façon dont les échanges sont calculés dans GR4J : les échanges sont une fonction de X3 et du niveau d'eau dans le réservoir de routage (Eq. 5.3). Il semble donc y avoir là une possibilité de contamination de la fonction de transfert par la fonction de production.

$$\text{échanges} = X3 \cdot \left(\frac{\text{niveau d'eau dans le réserv. de routage}}{X1} \right)^{3.5} \quad \text{Eq. 5.3}$$

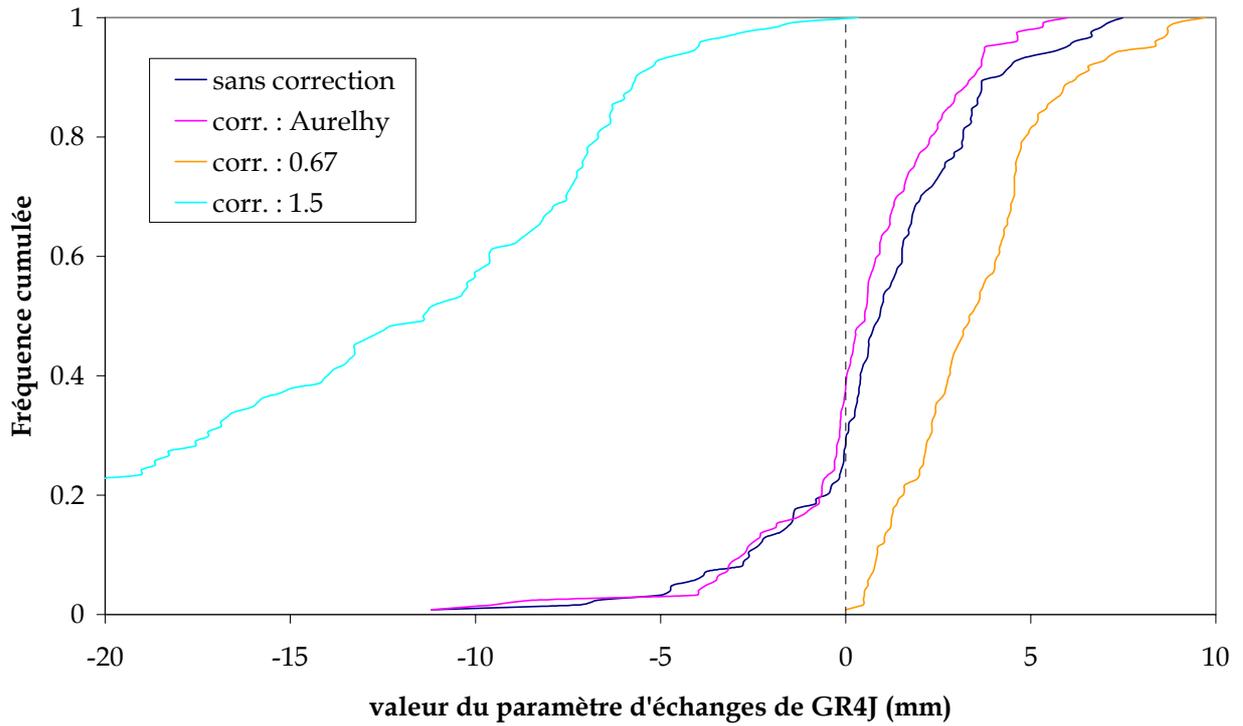


Figure 5.12 : comparaison des différentes méthodes de correction de la pluie en termes de distribution des valeurs calées du paramètre d'échange (X3) de GR4J

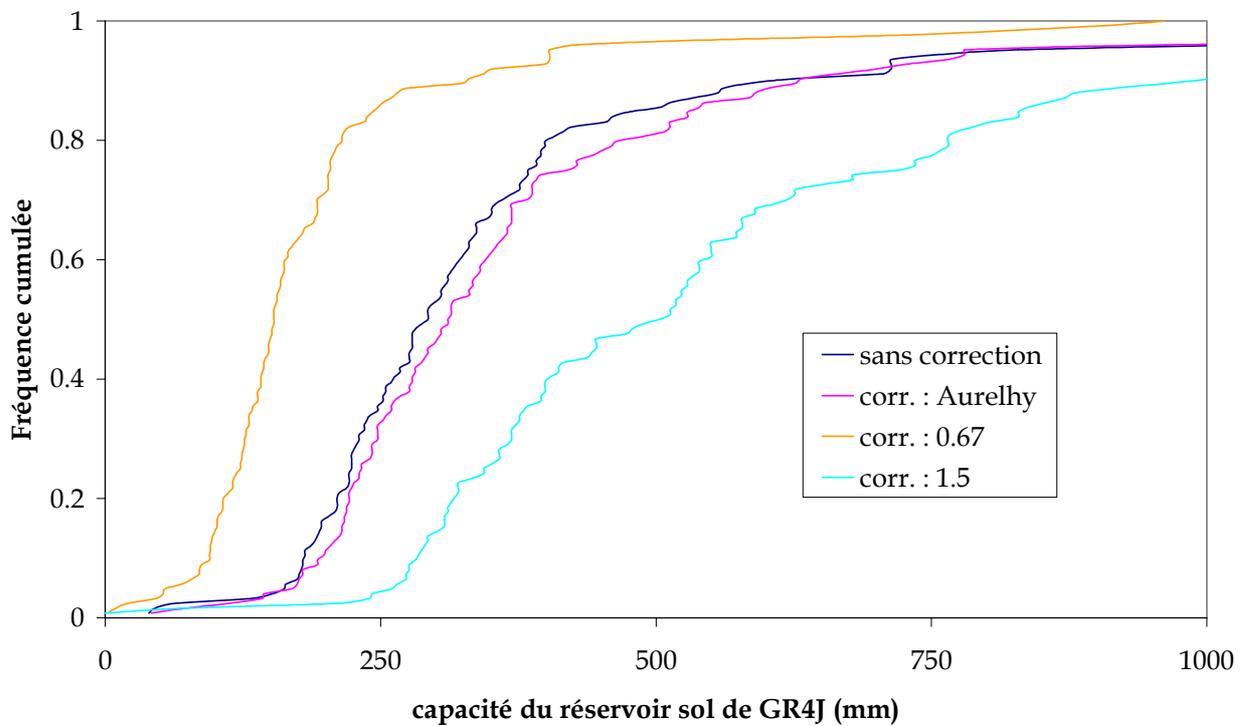


Figure 5.13 : comparaison des différentes méthodes de correction de la pluie en termes de distribution des valeurs calées de la capacité du réservoir sol (X2) de GR4J

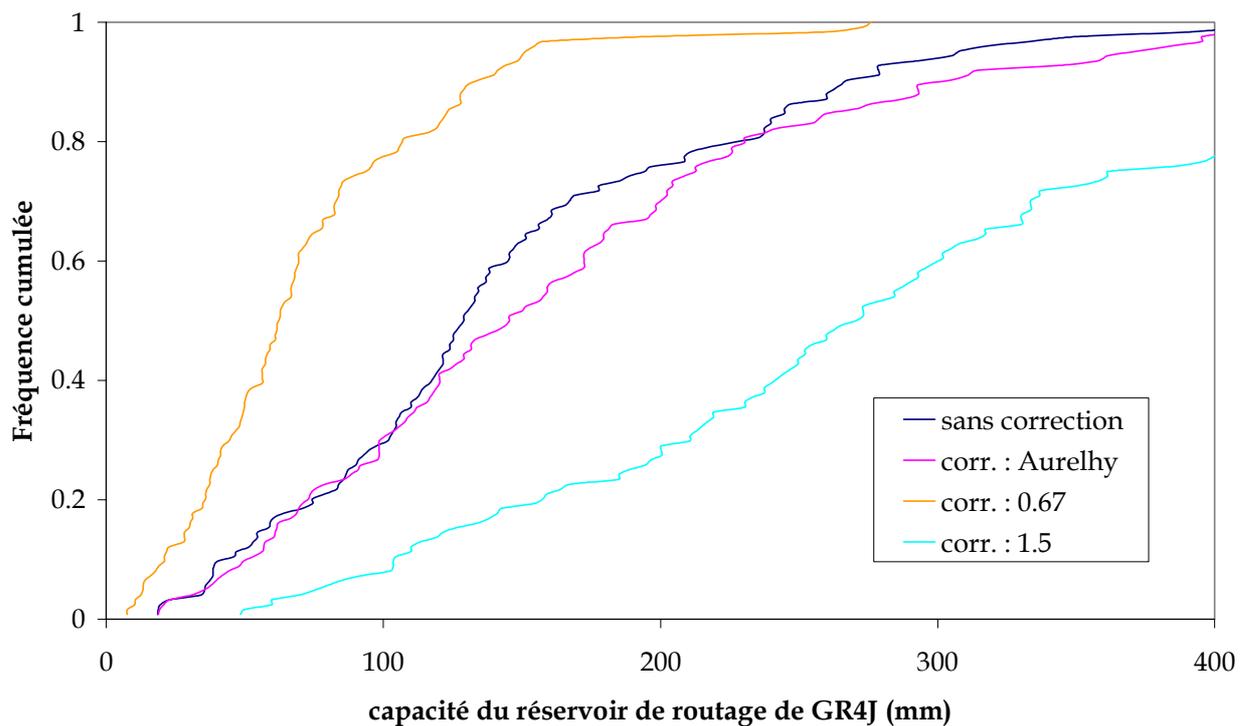


Figure 5.14 : comparaison des différentes méthodes de correction de la pluie en termes de distribution des valeurs calées de la capacité du réservoir de routage (X1) de GR4J

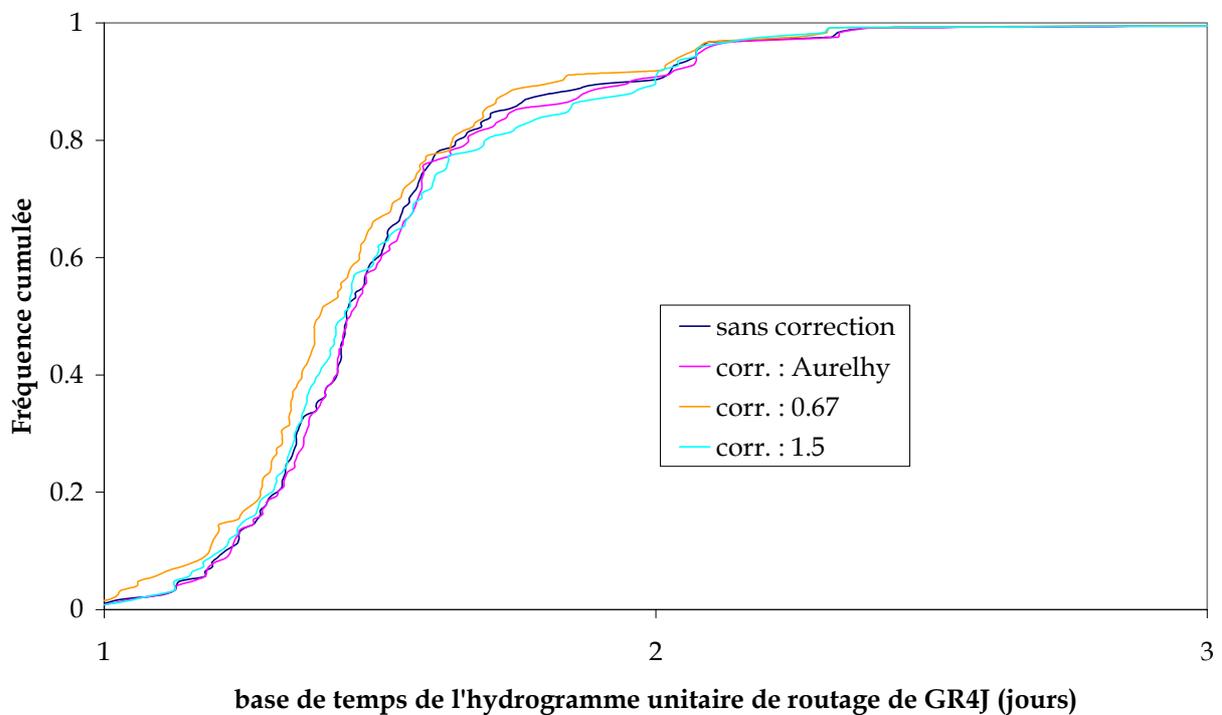


Figure 5.15 : comparaison des différentes méthodes de correction de la pluie en termes de distribution des valeurs calées du temps de base de l'hydrogramme unitaire de routage (X4) de GR4J

En conclusion, il apparaît bien que GR4J puisse, au cours de la procédure de calage, s'adapter dans une certaine mesure aux erreurs systématiques sur les pluies en modifiant pour cela ses paramètres. Cependant, l'impact en termes de performance de la correction apportée sur les pluies est très modeste. Pour avoir un impact sur les performances du modèle, une correction des pluies devra être sans doute beaucoup plus complexe et probablement non-linéaire par rapport aux abats journaliers.

5.3.5 Intérêt comparatif d'une correction de la pluie pour GR4J et TOPMO

Nous avons choisi TOPMO, une version modifiée de TOPMODEL, qui a donné de très bons résultats dans l'étude comparative de Perrin (2000). Nous présentons les résultats obtenus dans les mêmes conditions que pour GR4J en Figure 5.16 et Figure 5.17, en nous contentant cette fois de comparer les résultats sans correction de pluie et ceux avec correction (coefficient calculé avec la méthode cartographique).

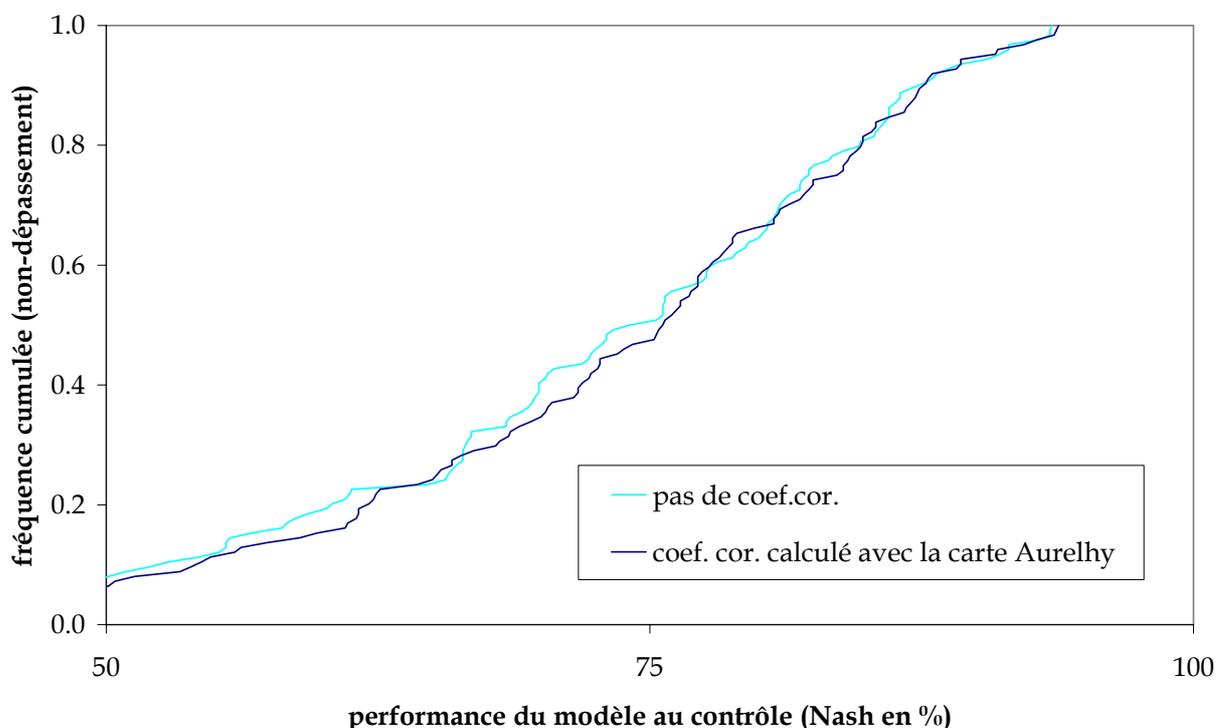


Figure 5.16 : distribution des résultats de TOPMO au contrôle selon les modalités de correction des pluies utilisées (Nash calculé sur les racines carrées des débits, bassins 44 et 45 omis)

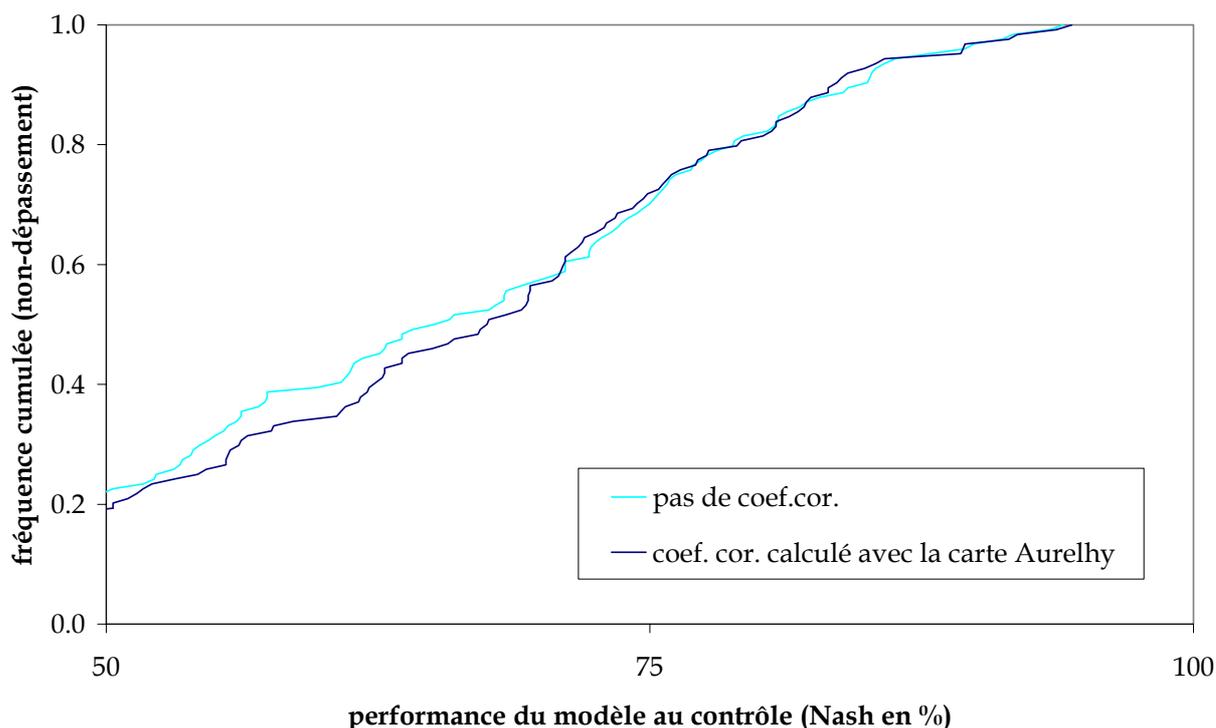


Figure 5.17 : distribution des résultats de TOPMO au contrôle selon les modalités de correction des pluies utilisées (Nash calculé sur les débits, bassins 44 et 45 omis)

Avec TOPMO, un léger avantage apparaît en faveur de la correction de pluie : pour la distribution des Nash calculés sur la racine des débits, l'avantage à l'utilisation du coefficient correcteur se traduit par une différence d'environ 2 % de Nash sur l'ensemble de la distribution; pour la distributions des Nash calculés sur les débits, l'avantage n'existe que pour le bas de la distribution, les deux distributions étant confondues au-dessus d'un certain seuil.

Il semble donc qu'une correction de pluie simple telle que celle que nous avons pratiquée puisse apporter, au-delà d'une satisfaction « théorique », une amélioration de notre capacité à représenter la relation pluie-débit au travers d'un modèle. Cependant, il est clair qu'en ce qui concerne le modèle que nous utilisons, GR4J, ce dernier peut se passer d'une correction aussi simple en s'adaptant, notamment au moyen de son coefficient d'échange.

5.4 Conclusion : Peut-on corriger la pluie ? Faut-il corriger la pluie ?

Dans ce chapitre, nous avons montré quelles pouvaient être les conséquences d'une mauvaise connaissance de la pluie de bassin pour un modèle hydrologique : l'incertitude sur la pluie de bassin se traduit par des performances moindres en moyenne, mais surtout, beaucoup plus variables (section 5.2.4). Cela signifie que, dès lors que les séries chronologiques de pluies fournies au modèle deviennent trop différentes de la pluie de bassin « réelle », on court le risque d'obtenir des performances très variables.

Cependant, les modèles hydrologiques tels que GR4J possèdent au sein de leur structure des degrés de liberté leur permettant dans une certaine mesure de s'adapter (au cours de l'optimisation des paramètres) aux biais sur les pluies. Inversement, cela signifie qu'une bonne estimation de la pluie est nécessaire pour une estimation de paramètres qui soient réellement « représentatifs »¹ du bassin versant (section 5.2.5).

Malheureusement, les études que nous avons menées au moyen des indices GORE et BILAN nécessitent de disposer d'un réseau de pluviomètres « de référence », permettant une estimation de la « vraie » pluie de bassin. Cela est rarement possible, sauf dans des cas où l'on souhaite réduire un réseau déjà existant. Aussi avons nous essayé d'identifier (Annexe III.4) des descripteurs simples, uniquement fondés sur la géométrie du réseau pluviométrique et sur sa place au sein du bassin versant, permettant de prévoir la qualité de la représentation pluviométrique sur le bassin. Cet essai s'est soldé par un échec relatif, et nous concluons donc que la place d'un pluviomètre au sein d'un réseau servant à calculer une pluie de bassin n'apporte que peu d'informations pertinentes sur son caractère représentatif de la pluie de bassin.

Enfin, constatant que dans notre échantillon de 63 bassins versants il existait un certain nombre de cas où l'on sous-estimait la pluie (et présentant qu'il y avait probablement un nombre équivalent de cas de sur-estimation cachés), nous avons cherché à utiliser une méthodologie simple de correction de la pluie sous forme d'un coefficient multiplicatif constant (section 5.3). Il est apparu que ce mode de correction ne permet pas d'obtenir de meilleures performances que l'absence de correction avec GR4J. Cependant, d'autres modèles, moins souples² que GR4J pour compenser les excès ou manques d'eau, peuvent faire bon usage de cette correction. Nous avons donc opté pour une prise en compte de la correction de pluie fournie par la carte des normales pluviométriques de Météo France.

¹ Cette remarque prend tout son sens lorsque l'on considère une étude de régionalisation, où l'on essaie de lier les paramètres à des descripteurs physiques. Une estimation assez moyenne des pluies, si elle n'empêche pas l'utilisation d'un modèle pluie-débit, gêne considérablement l'interprétation de ses paramètres.

² La fonction d'échange de GR4J représente une souplesse d'ajustement du bilan dont ne bénéficient pas les modèles utilisant uniquement des pertes par ETP.

6 SENSIBILITE DU MODELE PLUIE-DEBIT A LA VARIABILITE SPATIALE DE L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE (ETP)

6.1 L'ETP, composante déterminante du bilan en eau d'un bassin

L'Evapotranspiration Potentielle (ETP) est une variable climatique d'entrée qu'exploitent la grande majorité des modèles pluie-débit fonctionnant en continu. Intuitivement, il est naturel de vouloir prendre en compte l'évapotranspiration, qui représente une perte en tout début du cycle de l'eau, et qui conditionne l'évolution dans le temps de l'état d'humidité du bassin, et donc de sa réponse à la pluie.

Mais, au contraire de la pluie, l'ETP n'est pas directement mesurable et sa détermination passe elle-même par un modèle. Le plus connu, retenu comme référence par la Météorologie Nationale est celui de Penman (1948), modifié par Monteith (1965). La formule de Penman-Monteith est en hydrologie le modèle de choix (Shuttleworth, 1993). Elle décrit le flux de chaleur latente vertical λE_t de la façon suivante :

$$\lambda E_t = \frac{\Delta(R_n - G_t) + \frac{\rho C_p [e^\circ(z) - e(z)]}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad \text{Eq. 6.1}$$

où :

λ	:	chaleur latente de vaporisation
E_t	:	évaporation de la culture de référence
Δ	:	gradient de la fonction pression de vapeur saturante - température
R_n	:	radiation nette
G_t	:	flux vertical d'énergie calorifique dans le sol
ρ	:	densité de l'air
C_p	:	chaleur spécifique de l'air à pression constante
$e^\circ(z)$:	pression de vapeur saturante de l'air mesurée à la hauteur z
$e(z)$:	pression de vapeur de l'air mesurée à la hauteur z
r_a	:	résistance aérodynamique à la diffusion de la vapeur d'eau dans la couche limite atmosphérique
r_c	:	résistance de la canopée de la végétation au transfert de vapeur d'eau
γ	:	constante psychrométrique

Le nombre de stations où l'on dispose des données nécessaires au calcul de l'ETP est limité. Par conséquent, notre connaissance de ses variations spatiales reste assez approximative. Ce n'est pas très gênant en plaine, où l'ETP varie lentement. On peut alors se satisfaire des données fournies par le réseau synoptique de Météo France. Dans le Massif central, la situation n'est pas aussi bonne, les stations synoptiques

(souvent situées sur des aéroports) sont peu nombreuses et situées à basse altitude. On peut alors surestimer assez fortement l'ETP des bassins versants, notamment lorsque ceux-ci sont élevés.

Après avoir discuté la façon dont l'ETP est prise en compte dans les modèles hydrologiques, nous présenterons les possibilités d'obtenir **une meilleure régionalisation de l'ETP** et **une meilleure prise en compte de la variabilité inter-annuelle de l'ETP**, cela afin de nous placer dans les meilleures conditions possibles pour mener notre analyse de l'évolution du comportement hydrologique des bassins versants. Enfin, nous testerons l'efficacité des solutions de calcul de l'ETP qui auront été développées.

Précisons que dans ce chapitre, nous nous intéresserons exclusivement à l'évaluation de l'ETP en tant que donnée d'entrée du modèle, sans discuter la façon dont l'ETP est calculée en fonction de l'ETP et de l'état d'humidité du bassin versant. Pour plus de détails sur le fonctionnement de GR4J, voir le chapitre 3 ou se référer à Perrin (2000).

Note : un projet d'article présentant une partie du travail contenu dans ce chapitre est reproduit en annexe III.5 (*Andréassian, V., Perrin, et C., Michel, 2002. Impact of imperfect potential evapotranspiration knowledge on the efficiency and the parameters of watershed models. Soumis à publication au Journal of Hydrology*).

6.2 Utilisation de l'ETP dans les modèles pluie-débit

Dans le modèle GR4J, les données d'ETP utilisées classiquement sont les moyennes décennales inter-annuelles (Edijatno, 1991), calculées pour les postes du réseau synoptique (89 postes en France métropolitaine). Pour justifier l'utilisation de moyennes inter-annuelles, on peut avancer l'argument de la faible variance et de la faible auto-corrélation des séries chronologiques annuelles d'ETP (Tableau 6.1). Ainsi, lorsque l'on cale un modèle hydrologique sur trois ou quatre ans, l'ETP moyenne sur cette période est très proche de l'ETP moyenne inter-annuelle.

Notons que l'utilisation de données moyennes d'ETP est un phénomène assez général en modélisation pluie-débit. Ainsi, Burnash (1995) n'hésite pas à affirmer qu'en bien des endroits, une courbe moyenne annuelle d'évapotranspiration aura autant de signification que toute autre information discrète (c'est à dire, datée)¹.

¹ « In many areas an average annual evapotranspiration curve appears to be as meaningful as any readily available discrete information ».

Tableau 6.1 : Caractéristiques de l'ETP (Penman-Monteith) en 15 postes du réseau synoptique du Massif central

Station du réseau synoptique	ETP moyenne annuelle (mm)	Ecart type de l'ETP annuelle (mm)	Coeff. de variation (%)	Auto-corrélation	Nombre d'années utilisées
AURILLAC	748	76	10	0.44	18
CARCASSONNE	1082	72	7	-0.05	30
CLERMONT-FERRAND	898	71	8	0.36	47
GOURDON	776	43	6	-0.11	30
LE-PUY (CHADRAC)	809	62	8	0.32	35
LIMOGES	719	46	6	-0.07	30
LYON (BRON)	902	73	8	0.24	48
MILLAU	964	72	7	-0.11	32
MILLAU (BARRY)	892	69	8	-0.45	15
MONT-AIGOUAL	629	64	10	0.00	18
MONTPELLIER	1158	77	7	0.42	48
NIMES (COURBESSAC)	1290	69	5	0.06	47
SAINT-ETIENNE	850	66	8	0.39	25
TARARE	714	54	8	-0.08	30
VICHY	772	57	7	0.13	47

Parmi les tentatives faites pour améliorer la prise en compte de l'ETP dans GR4J, on peut citer celles d'Edijatno (1991) et de Kribèche (1994). Edijatno a montré sur un échantillon de dix bassins versants que l'utilisation de données d'ETP datées au lieu de données moyennes ne donnait pas systématiquement de meilleurs résultats ; de plus, l'amélioration moyenne des performances du modèle était très faible. Kribèche, travaillant sur trois bassins, a utilisé des données d'ETP datées au pas de temps journalier. Il ne trouve cependant aucune amélioration notable des performances du modèle.

Hervieu (2001) pour sa part a comparé 32 formulations d'ETP différentes, et a comparé leur impact sur les performances de GR4J. Il a confirmé que l'ETP datée n'avait pas d'avantage sur l'ETP moyenne interannuelle, les performances de GR4J étant très proches dans tous les cas. Il a également montré que les formules utilisant uniquement température et rayonnement suffisent au modèle, et que les modèles d'ETP dérivés de la formule de Penman n'apportent pas d'amélioration, malgré leur recours à deux paramètres climatiques supplémentaires (vitesse du vent et humidité de l'air).

Ces échecs nous ont amené à nous intéresser en priorité aux possibilités de régionalisation de l'ETP moyenne annuelle et mensuelle (section 6.3). Dans un deuxième temps, nous approcherons d'une façon simplifiée les variations inter-annuelles de l'ETP (section 6.4).

6.3 Régionalisation de l'ETP moyenne annuelle et mensuelle dans le Massif central

Nous avons pu régionaliser l'ETP grâce à des données qui nous ont été fournies gracieusement par Météo-France, et qui concernaient 42 stations réparties dans le Massif central (Tableau 6.2). Ces données sont issues pour leur plus grande part de stations automatiques installées récemment, mais nous n'avons pris en compte que les postes qui présentaient au moins cinq années de mesures.

Tableau 6.2 : Liste des 42 stations utilisées pour la régionalisation de l'ETP dans le Massif central

Code	Nom de la station	X Lambert (hm)	Y Lambert (hm)	Altitude (m)	ETP moyenne inter-annuelle (mm)
03060001	CHARMEIL	6822	21302	249	771
03155003	LURCY-LEVIS	6466	21912	225	722
03185006	MONTLUCON	6206	21509	207	809
03200001	NEUVY	6728	21726	250	764
03248001	SAINT-NICOLAS-DES-BIEFS	7135	21178	1022	578
07068001	COLOMBIER-LE-JEUNE	7840	20045	585	937
07131001	LANAS	7615	19510	280	1168
11004001	ALAIGNE	5805	17900	293	991
11069001	CARCASSONNE	5979	18012	126	1080
12145001	MILLAU	6547	19021	715	961
12145011	MILLAU-BARRY	6571	19001	409	892
12194002	QUINS	6036	19152	632	820
12208004	SAINT-AFFRIQUE	6411	18851	365	867
12300004	VILLEFRANCHE-DE-ROUERGUE	5748	19297	345	804
15014004	AURILLAC	6066	19886	639	746
15187006	SAINT-LOUR	6576	20029	909	666
19031008	BRIVE-LA-GAILLARDE	5321	20167	111	832
26198001	MONTELMAR	7907	19563	73	1119
30132003	LA GRAND-COMBE	7342	19154	288	1144
30189001	NIMES	7665	18749	59	1289
30339001	VALLERAUGUE	6998	19031	1567	628
30341003	VAUVERT	7587	18534	50	1294
34151005	MARSILLARGUES	7483	18492	2	1001
34154001	MAUGUIO	7313	18431	3	1157
42005001	ANDREZIEUX-BOUTHEON	7526	20611	400	850

Code	Nom de la station	X Lambert (hm)	Y Lambert (hm)	Altitude (m)	ETP moyenne inter-annuelle (mm)
43046001	CHADRAC	7227	20074	714	806
43062001	CHASPUZAC	7086	20101	833	715
43096001	FONTANNES	6850	20340	435	838
43111002	LANDOS	7192	19855	1148	629
46127001	GOURDON	5254	19722	259	776
48030001	BRENOUX	6949	19456	1019	711
48095005	MENDE	6889	19487	932	789
63098001	CHASTREIX	6342	20593	1385	625
63113001	CLERMONT-FERRAND	6638	20880	329	897
63319002	SAINT-ANTHEME	7199	20639	1260	543
63354004	SAINT-GERVAIS-D'AUVERGNE	6369	21148	705	734
63399001	SAINT-SULPICE	6206	20720	850	672
69029001	BRON	8023	20836	198	901
69174001	TARARE	7594	21066	720	714
69299001	COLOMBIER-SAUGNIEU	8136	20866	235	943
82039001	CAYRAC	5331	19018	132	718
87085001	LIMOGES	5104	20929	402	719

Localisation des postes ETP

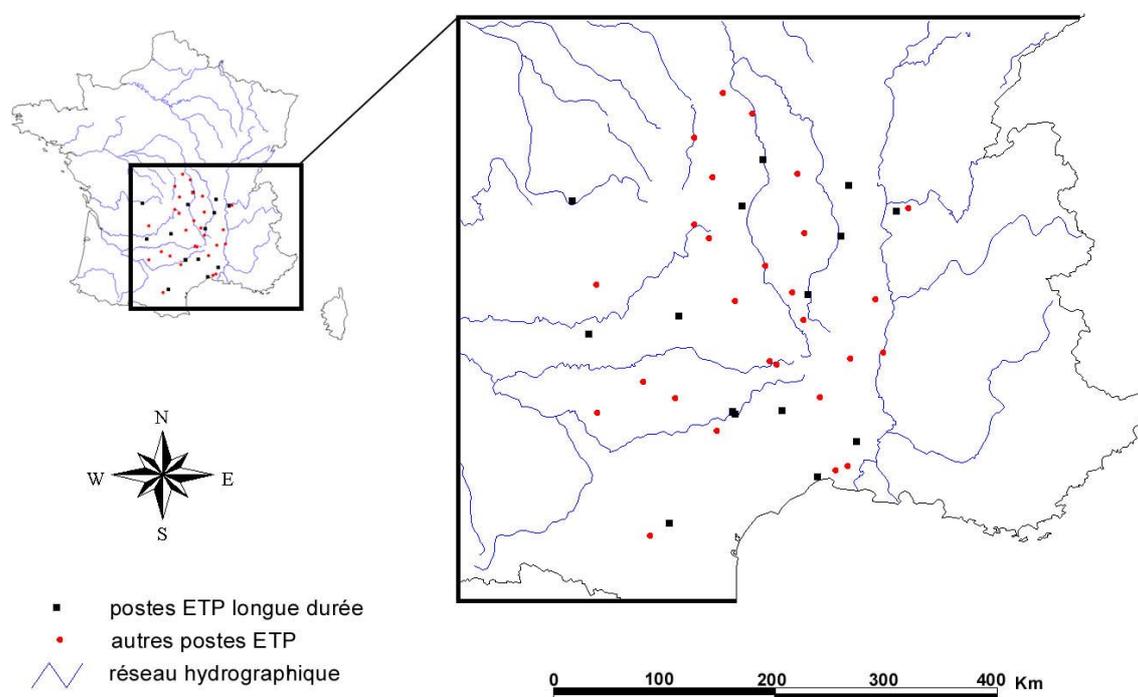


Figure 6.1 : Localisation des postes d'ETP utilisées dans ce chapitre

Partie III : Questions de modélisation hydrologique

Sur cet échantillon, nous avons commencé par rechercher une équation de régionalisation au pas de temps annuel, de la forme :

$$ETP = a + bX + cY + dZ \quad \text{Eq. 6.2}$$

X, Y, et Z représentant respectivement les coordonnées Lambert de la station et son altitude

Le résultat est encourageant. On obtient une régression significative, avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.84$, dont les caractéristiques sont les suivantes :

Tableau 6.3 : résultats de la régression linéaire de l'Eq. 6.2

Paramètre	a	b (X)	c (Y)	d (Z)
Unité	mm	mm/hm	mm/hm	mm/m
valeur estimée	2015	0.092	-0.082	-0.294
rapport de Student (valeur estimée / écart type)	7.9	5.9	-6.9	-9.4
Niveau de signification ¹	> 99%	> 99%	> 99%	> 99%

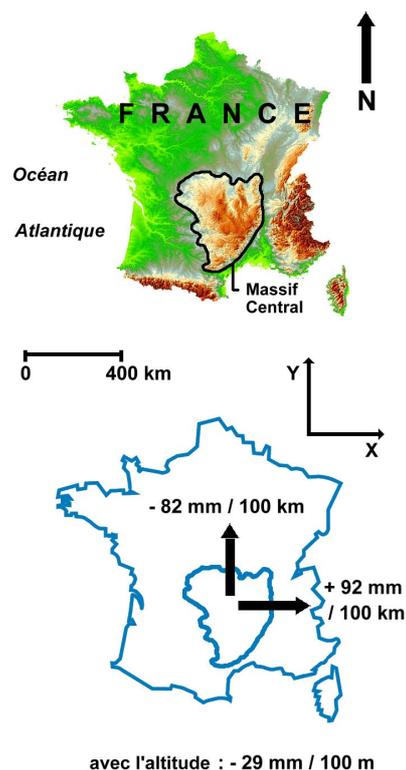


Figure 6.2 : évolution de l'ETP moyenne annuelle de Penman-Monteith dans le Massif central

¹ Pour évaluer la significativité de l'un des coefficients de la régression multiple, on compare le rapport (valeur estimée / écart type) à la variable |t| de Student à n-4 degrés de liberté.

Chapitre 6 : Sensibilité des modèles pluie-débit à l'ETP

Le Tableau 6.3 et la Figure 6.2 montrent que dans le Massif central, l'ETP moyenne annuelle décroît de 29 mm lorsque l'on s'élève de 100 m, de 82 mm lorsque l'on fait 100 km vers le Nord, et qu'elle s'accroît de 92 mm lorsque l'on fait 100 km vers l'Est (effet de continentalité). Ces résultats sont très instructifs, et seul le signe du paramètre c était prévisible. Pour ce qui est de l'effet de continentalité par exemple, il n'était pas évident qu'il se fasse sentir déjà dans le centre de la France. La décroissance de l'ETP avec l'altitude n'était pas non plus un résultat acquis d'avance : en effet, si la température décroît avec l'altitude, la vitesse du vent croît généralement, de même que la radiation solaire incidente. Localement, la relation peut être d'ailleurs inverse : c'est le cas à Millau où l'on gagne 70 mm d'ETP annuelle en s'élevant de 300 m.

Nous avons poursuivi pour savoir s'il était possible de régionaliser également l'évapotranspiration moyenne au pas de temps mensuel, afin d'obtenir simultanément la distribution spatiale et temporelle de l'ETP. Le modèle s'écrit alors :

$$ETP_i = a_i + b_i X + c_i Y + d_i Z \quad \text{Eq. 6.3}$$

avec $i = 1, 12$

Les paramètres calculés sont présentés au Tableau 6.4, accompagnés du rapport (valeur estimée / écart type), qui permet de vérifier à chaque fois la significativité de chaque variable explicative.

Tableau 6.4 : résultats des régressions linéaires permettant de calculer l'ETP moyenne mensuelle (Eq. 6.3)

Mois	a	b (X)	c (Y)	d (Z)	R ²
1	83 4.0	0.005 3.9	-0.004 -4.6	-0.008 -3.2	0.57
2	96 4.9	0.005 4.2	-0.005 -5.2	-0.013 -5.6	0.69
3	123 5.9	0.006 4.7	-0.005 -4.9	-0.023 -9.0	0.79
4	151 5.7	0.008 4.7	-0.006 -4.5	-0.032 -10.0	0.81
5	209 7.4	0.007 4.2	-0.007 -5.2	-0.036 -10.4	0.82
6	281 8.4	0.010 5.0	-0.010 -6.6	-0.044 -10.7	0.85
7	304 8.0	0.015 6.5	-0.012 -6.7	-0.043 -9.3	0.84
8	261 6.9	0.013 5.7	-0.010 -5.8	-0.037 -8.0	0.79
9	227 6.9	0.008 4.1	-0.010 -6.2	-0.030 -7.5	0.77
10	123 6.2	0.005 4.0	-0.005 -5.4	-0.013 -5.5	0.69

Mois	a	b (X)	c (Y)	d (Z)	R ²
11	86	0.005	-0.004	-0.008	0.56
	4.1	3.9	-4.6	-3.0	
12	72	0.005	-0.004	-0.006	0.59
	4.1	4.5	-4.8	-2.9	

Le Tableau 6.4 montre qu'il est directement possible de régionaliser l'ETP moyenne au pas de temps mensuel¹. De plus, la grande régularité d'évolution des paramètres au cours de l'année permet d'envisager un développement limité d'ordre 2 en série de Fourier pour le calcul de a_i , b_i , c_i et d_i , afin de réduire le nombre des paramètres (20 au lieu de 48). Cette même approche a été utilisée pour le Nord-Est des Etats Unis par Fennessey et Vogel (1996), qui utilisent également un développement d'ordre 2.

Pour x_i pouvant être égal à a_i , b_i , c_i et d_i , le développement limité s'écrit :

$$x_i \approx \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^2 \left(A_n \cos \frac{ni\pi}{6} + B_n \sin \frac{ni\pi}{6} \right) \quad \text{Eq. 6.4}$$

avec :

$$A_n = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^{12} x_i \cos \frac{ni\pi}{6} \quad \text{Eq. 6.5}$$

$$B_n = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^{12} x_i \sin \frac{ni\pi}{6} \quad \text{Eq. 6.6}$$

$$A_0 = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^{12} x_i \quad \text{Eq. 6.7}$$

Les paramètres du développement limité en série de Fourier sont présentés au Tableau 6.5.

Tableau 6.5 : paramètres du développement limité en série de Fourier (Eq. 6.4) pour le calcul de l'ETP mensuelle dans le Massif central

Paramètre de la série de Fourier	a	b (X)	c (Y)	d (Z)
A0	335.8	0.0153	-0.0137	-0.0490
A1	-100.4	-0.0036	0.0030	0.0190
B1	-45.2	-0.0018	0.0019	0.0023
A2	4.7	0.0003	-0.0002	0.0006
B2	25.3	0.0019	-0.0013	-0.0017

¹ On peut remarquer que le coefficient de corrélation R^2 est maximal en Juin (0.86) et minimal en Janvier (0.57). De la même façon, les paramètres explicatifs connaissent un minimum de significativité en hiver. Ceci s'explique simplement par le fait que l'ETP des mois d'hiver est relativement moins bien corrélée avec l'altitude, la latitude et la longitude. Voir Figure 6.3 : l'ETP de janvier est la même à Montélimar et sur le Mont Aigoual.

Chapitre 6 : Sensibilité des modèles pluie-débit à l'ETP

On pourra utiliser les paramètres présentés au Tableau 6.5 pour obtenir une estimation directe de l'ETP journalière, de la façon suivante :

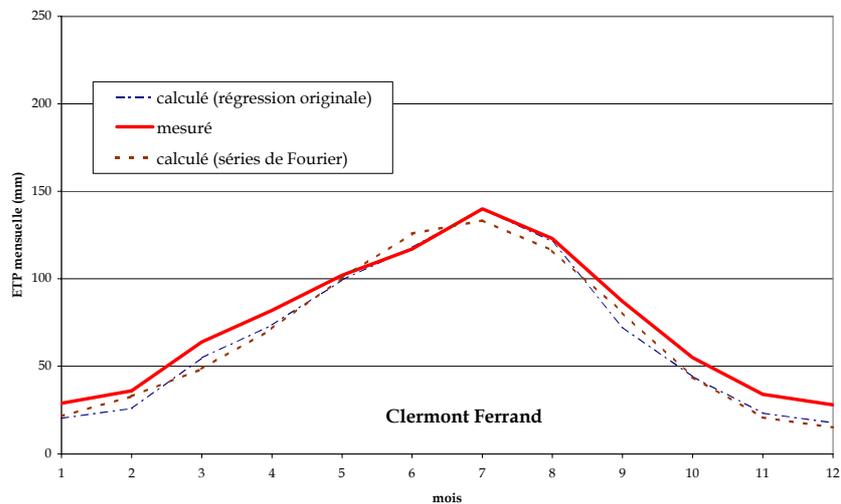
$$\text{ETP}_j = a_j + b_j X + c_j Y + d_j Z \quad \text{Eq. 6.8}$$

avec $j = 1, 365$

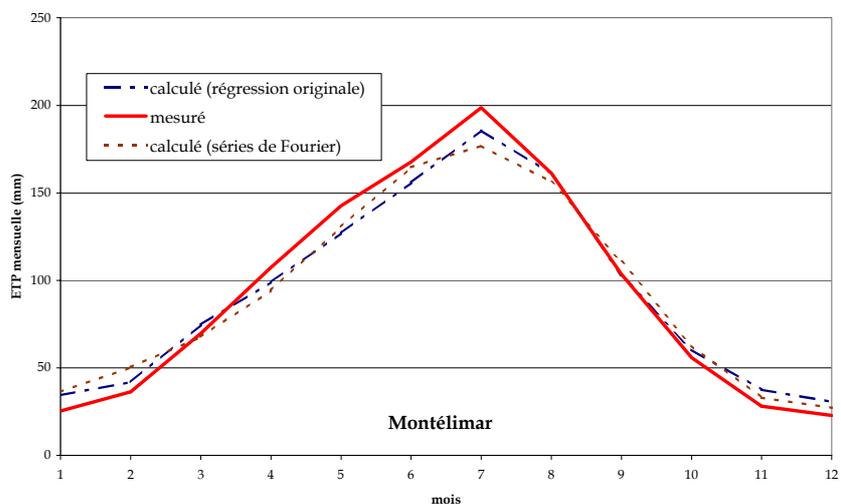
Pour x_j pouvant être égal à a_j , b_j , c_j et d_j , le développement limité en série de Fourier s'écrivant :

$$x_j \approx \frac{12}{365.25} \left[\frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^2 \left(A_n \cos \frac{(j+15)n2\pi}{365.25} + B_n \sin \frac{(j+15)n2\pi}{365.25} \right) \right] \quad \text{Eq. 6.9}$$

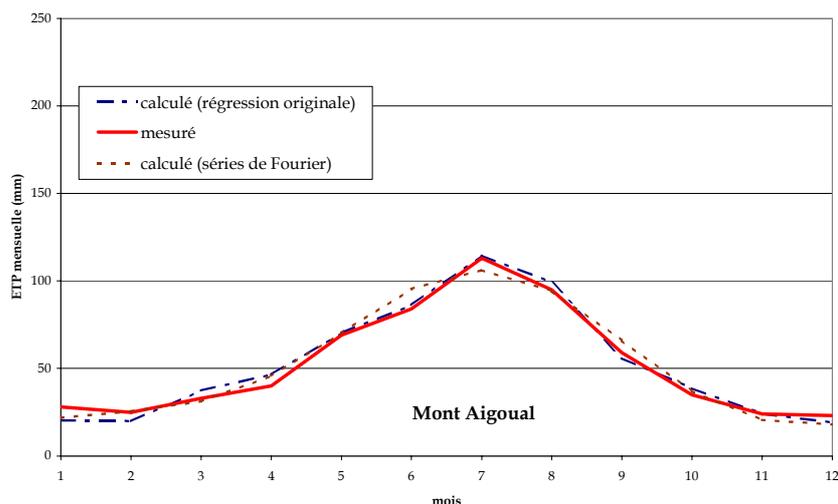
A titre d'illustration, on a représenté en Figure 6.3 trois exemples de calcul de l'ETP moyenne mensuelle au moyen des Eq. 6.3 et Eq. 6.4.



(a)



(b)



(c)

Figure 6.3 : exemples de variation mensuelle de l'ETP et de son calcul par les formules régionales pour Clermont-Ferrand (a), Montélimar (b) et le Mont Aigoual (c)

Nous avons donc obtenu dans cette section une relation régionale permettant de calculer de façon satisfaisante l'évapotranspiration potentielle moyenne journalière en tout point du Massif central, à partir de ses coordonnées Lambert et de son altitude. L'exposition, qui est potentiellement une variable explicative intéressante, n'a pas pu être prise en compte car nous ne disposons pas des données¹. Cependant, l'intérêt de cette variable est moindre lorsqu'il s'agit de calculer une valeur moyenne pour tout un bassin versant, les différentes expositions s'y compensant plus ou moins. Nous proposons en Annexe III.3 une carte de l'ETP moyenne interannuelle dans le Massif central, basée sur la relation établie en Eq. 6.2. Cette carte a été calculée sur la base d'un MNT kilométrique, et elle ne tient pas compte de l'orientation des mailles².

Dans la section suivante, nous abordons la question de la prise en compte des variations inter-annuelles de l'ETP.

6.4 Caractérisation des variations inter-annuelles de l'ETP

La Figure 6.4 présente les variations inter-annuelles de l'ETP pour les 15 postes du réseau synoptique, sur lesquels nous disposons de séries chronologiques d'une longueur suffisante. L'observation visuelle confirme les conclusions tirées du

¹ La quasi-totalité des stations météorologiques se situent sur des terrains très plats (souvent sur des aéroports).

² L'orientation est certainement un paramètre important pour estimer précisément l'ETP sur de très petites surfaces ou de petits bassins versants. Cornish (1993) par exemple propose en Australie une régression significative entre ETP et l'orientation et l'altitude de petits bassins versants (de taille inférieure à 1 km²). Cependant, l'importance de ce paramètre doit s'atténuer avec la taille des bassins versants.

Chapitre 6 : Sensibilité des modèles pluie-débit à l'ETP

Tableau 6.1 : faibles variations inter-annuelles (le coefficient de variation ne dépasse pas 10%), et faible auto-corrélation. Tout semble donc militer pour que l'on puisse se satisfaire de données moyennes régionalisées. Cependant, dans la mesure où nous recherchons des tendances du comportement des bassins versants, nous nous efforçons de réduire tout biais méthodologique lié aux entrées des modèles. Pour cela, nous essayons dans cette section d'établir un indice régional annuel de l'ETP (indice RAETP).

La Figure 6.5 présente les variations annuelles d'ETP sous forme relative : on y détecte un comportement d'ensemble (« régional »), avec des minima communs en 1951, 1963 et 1977, et des maxima communs en 1952, 1976, 1989 et 1995. On se propose donc de définir l'indice régional annuel d'ETP (RAETP), comme la moyenne des valeurs relatives de l'ETP annuelle pour chacun des postes disponibles cette année-là.

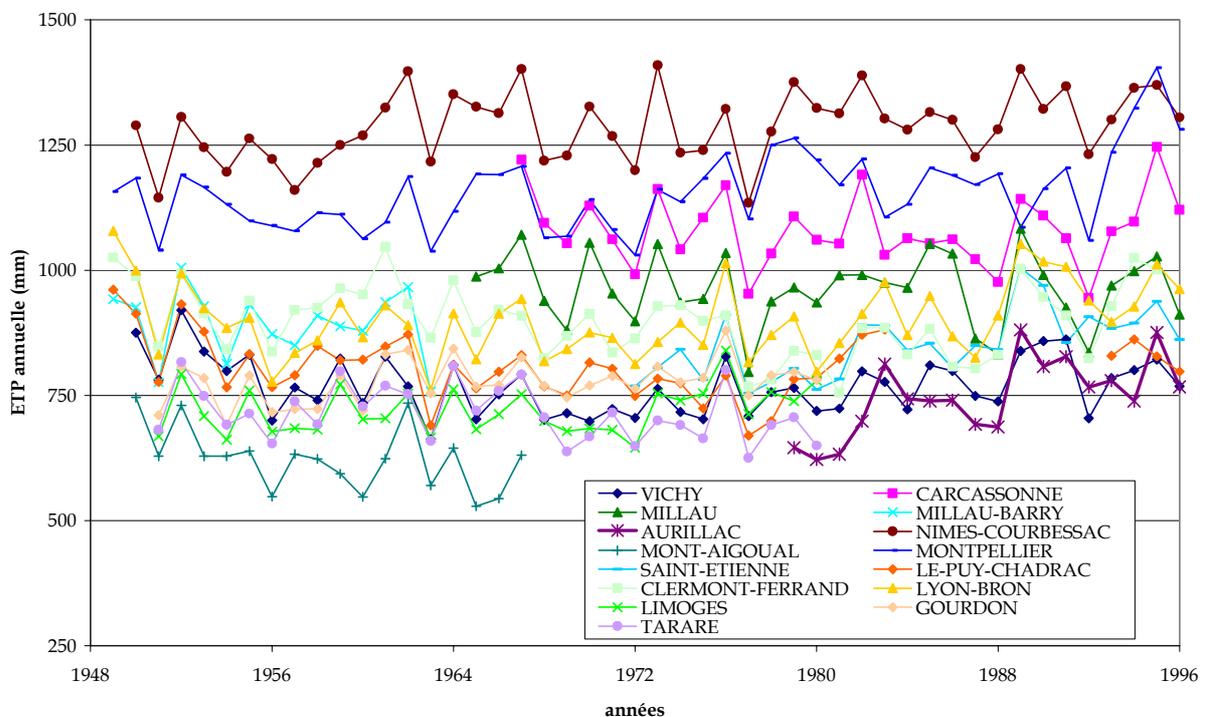


Figure 6.4 : évolution de l'ETP annuelle en 15 postes du Massif central

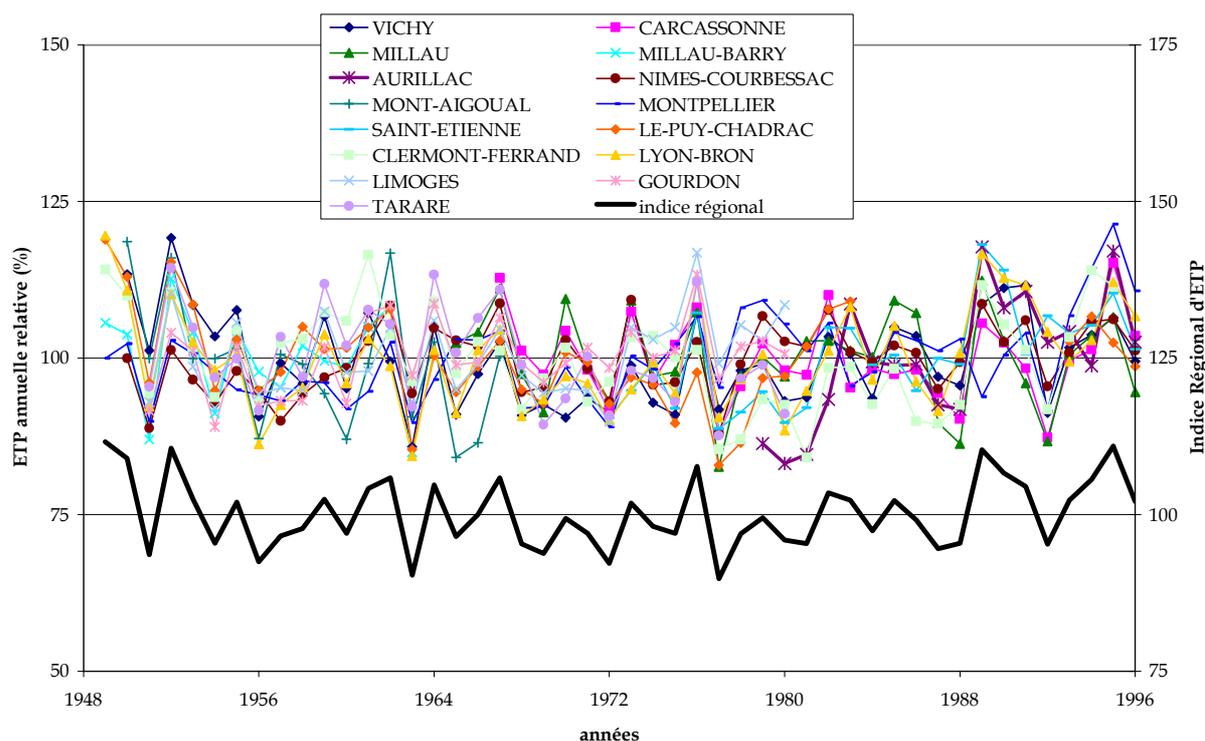


Figure 6.5 : évolution relative de l'ETP annuelle en 15 postes du Massif central, et comportement de l'indice régional annuel d'ETP (RAETP) (note : l'échelle de ce dernier est décalé)

Pour évaluer l'intérêt de cet indice régional, on a présenté au Tableau 6.6 les corrélations existant entre les séries d'ETP relative et l'indice RAETP.

Tableau 6.6 : corrélation existant entre l'indice régional annuel d'ETP (RAETP) et l'indice local pour les 15 stations de longue durée

Station	Corrélation entre indice régional et indice local	Nombre d'années utilisées	Niveau de signification ¹
AURILLAC	0.78	18	> 99 %
CARCASSONNE	0.77	30	> 99 %
CLERMONT-FERRAND	0.78	47	> 99 %
GOURDON	0.76	30	> 99 %
LE-PUY-CHADRAC	0.80	39	> 99 %
LIMOGES	0.71	30	> 99 %
LYON-BRON	0.88	48	> 99 %

¹ $F_{0.99}$ étant le quantile 0.99 de la distribution de la variable F de Fischer à (k-1) et (n-k) degrés de liberté, on pourra être sûr à 99% de l'existence d'une corrélation si $R^2 > \frac{F_{0.99}}{F_{0.99} + \frac{n-k}{k-1}}$

Station	Corrélation entre indice régional et indice local	Nombre d'années utilisées	Niveau de signification ¹
MILLAU	0.72	32	> 99 %
MILLAU-BARRY	0.86	15	> 99 %
MONT-AIGOUAL	0.72	18	> 99 %
MONTPELLIER	0.50	48	> 99 %
NIMES-COURBESSAC	0.72	47	> 99 %
SAINT-ETIENNE	0.80	25	> 99 %
TARARE	0.87	30	> 99 %
VICHY	0.83	47	> 99 %

Le résultat semble globalement satisfaisant, même si certaines stations (Montpellier notamment) sont moins bien corrélées avec les variations des autres stations de la région. Peut-être est-ce dû à une influence maritime (la station de Montpellier-Mauguio se trouve à proximité immédiate de l'étang du même nom).

Pour contrôler la validité de l'indice RAETP nous avons extrait, de notre échantillon de 42 postes, 8 postes n'ayant pas servi à l'établissement de l'indice, soit pour des raisons de longueur insuffisante de chronique, soit parce que nous les avons obtenus par la suite. Les corrélations sont présentées au Tableau 6.7.

Tableau 6.7: résultats de contrôle de validité pour l'indice RAETP sur 8 postes n'ayant pas servi à son calcul

Station	Corrélation entre indice régional et indice local	Nombre d'années utilisées	Niveau de signification
CHARMEIL	0.83	47	> 99 %
LANAS	0.78	5	88 %
BRIVE-LA-GAILLARDE	0.93	9	> 99 %
GUERET	0.84	8	> 99 %
CHASPUZAC	0.44	12	85 %
BRENOUX (aéroport de Mende)	0.72	5	83 %
SAINT-SULPICE	0.81	4	81 %
COLOMBIER-SAUGNIEU	0.86	6	97 %

A nouveau, les résultats de contrôle semblent plutôt satisfaisants, avec seulement un poste présentant une corrélation inférieure à 0.7. Ceci démontre le bon pouvoir prédictif de cet indice et justifie l'utilisation que nous nous proposons d'en faire.

Nous avons obtenu successivement une meilleure description de la variabilité régionale de l'ETP, et une possibilité de prendre en compte sa variabilité inter-

annuelle. D'autres tentatives ont été faites pour spatialiser au mieux la donnée ETP, notamment en essayant d'exploiter un lien pluie-ETP. Cette tentative ayant été infructueuse (mais potentiellement riche d'enseignements), nous ne la présentons qu'en Annexe III.3. Dans la section suivante, nous passons au test final, permettant de juger de l'utilité des résultats obtenus pour identifier à travers GR4J la relation pluie-débit sur un bassin versant.

6.5 Impact du mode de calcul de l'ETP sur la performance des modèles pluie-débit

Dans cette section, nous avons évalué les performances du modèle GR4J (en mode calage et en mode contrôle), pour 7 situations (Tableau 6.8), sur 63 bassins versants.

Tableau 6.8 : Caractéristiques des sept modes de calcul de l'ETP qui ont servi à tester les performances de GR4J

N°	Mode de calcul de l'ETP		
	<i>régionalisé</i>	<i>annualisé</i>	<i>description</i>
-2			« Nîmes » : la même ETP journalière est utilisée pour tous les bassins versants. Elle correspond à l'ETP moyenne inter-annuelle de Nîmes.
-1			« Mont-Aigoual » : la même ETP journalière est utilisée pour tous les bassins versants. Elle correspond à l'ETP moyenne inter-annuelle du Mont Aigoual.
0			« Aveugle » : la même ETP journalière est utilisée pour tous les bassins versants. Elle correspond à l'utilisation de l'Eq. 6.9 pour un point au centre du Massif central.
1			« Classique » : l'ETP journalière de chaque bassin versant est calculée à partir des moyennes décennales inter-annuelles des stations synoptiques du réseau Météo France les plus proches du bassin (méthode habituellement utilisée pour GR4J).
2		x	« Classique Annualisé » : l'ETP est calculée à partir des moyennes décennales inter-annuelles des stations synoptiques, et on « annualise » le total annuel au moyen de l'indice RAETP.
3	x		« Régionalisé » : l'ETP journalière est calculée à partir de la formule de régionalisation présentée en Eq. 6.9, en prenant comme paramètre les coordonnées du centre d'inertie et l'altitude moyenne du bassin.
4	x	x	« Régionalisé Annualisé » : l'ETP journalière est calculée comme en 3, et on « annualise » le total annuel au moyen de l'indice RAETP.

Nous avons choisi d'évaluer l'intérêt respectif de chacun des modes de calcul sur la base des performances du modèle pluie-débit au contrôle, sur la totalité de notre

Chapitre 6 : Sensibilité des modèles pluie-débit à l'ETP

échantillon de bassins versants : pour chaque bassin, deux périodes successives de trois ans étaient sélectionnées, de telle sorte que l'on puisse considérer que le comportement pluie-débit était resté inchangé entre les deux périodes. Nous avons ensuite procédé de façon classique, en calant le modèle sur l'une des périodes, et en le validant sur l'autre (Klemeš, 1986). Pour mieux faire ressortir l'importance relative des modifications que nous avons proposées dans ce chapitre (régionalisation et annualisation), nous avons aussi choisi de tester trois modes de calcul dégradé (options -2, -1 et 0), correspondant à l'utilisation d'une même ETP moyenne journalière pour chaque bassin et pour chaque année.

Dans le Tableau 6.9 et le Tableau 6.10, nous présentons les résultats au contrôle sous forme de critère de performance moyen sur l'échantillon total, puis nous évaluons graphiquement l'amélioration apportée par le mode de calcul n°4 par rapport à chacun des autres modes de calcul à la Figure 6.6.

Tableau 6.9 : performance moyenne de GR4J en contrôle selon le mode de calcul de l'ETP, sur l'échantillon de 63 bassins versants (126 périodes de contrôle)

Mode de Calcul de l'ETP (voir Tableau 6.8)	-2	-1	0	1	2	3	4
Critère de Nash et Sutcliffe moyen sur l'échantillon (en %)	70.1	74.0	73.8	74.1	74.4	74.4	74.5

Tableau 6.10 : comparaison des performances du mode 4 et des autres modes de calcul de l'ETP

Mode 4 comparé au mode :	-2	-1	0	1	2	3
Pourcentage des cas où la performance moyenne en mode 4 est supérieure	93	55	64	67	64	52

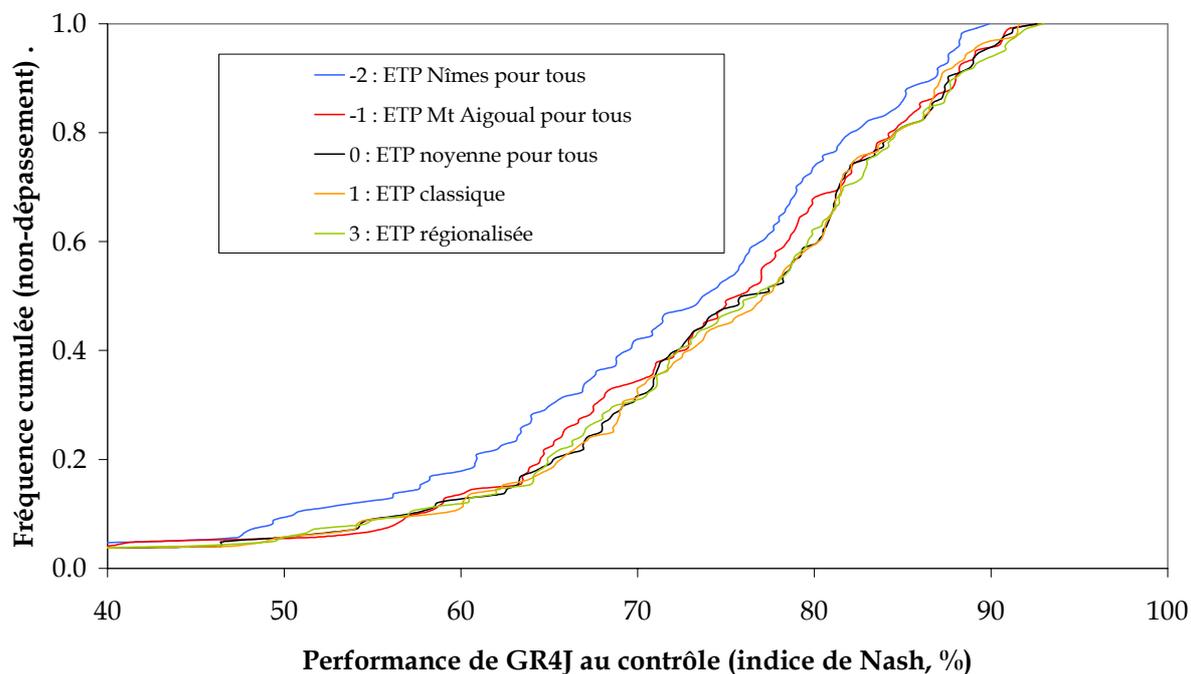


Figure 6.6 : comparaison des différentes méthodes de calcul de l'ETP en termes de distribution des résultats de GR4J au contrôle (plus une distribution se porte vers la droite, meilleure elle est)

La Figure 6.6 résume bien la situation : le seul mode de calcul qui se distingue nettement est le mode -2, pour lequel le modèle pluie-débit donne au contrôle des résultats nettement moins bons. Pour tous les autres modes de calcul de l'ETP, l'avantage du mode 4, le plus « perfectionné », est infime. Il semble que le modèle GR4J se satisfasse d'une estimation très moyenne de l'ETP, tant que celle-ci n'est pas trop élevée.

D'un point de vue purement pratique, ceci signifie que l'on peut se contenter de la méthode 1 (« classique ») ou de la méthode 3 (« régionalisée »), toutes deux très simples à mettre en œuvre. Dans la section suivante, nous approfondissons notre réflexion en essayant de comprendre comment le modèle parvenait à s'adapter à des entrées très différentes au niveau de l'ETP.

6.6 Impact du mode de calcul de l'ETP sur les paramètres de GR4J

Les Figure 6.7 à Figure 6.10 présentent la distribution des valeurs calées des 4 paramètres de GR4J en fonction du mode de calcul de l'ETP (on a repris 6 des 7 situations présentées au Tableau 6.8). On peut proposer l'interprétation suivante :

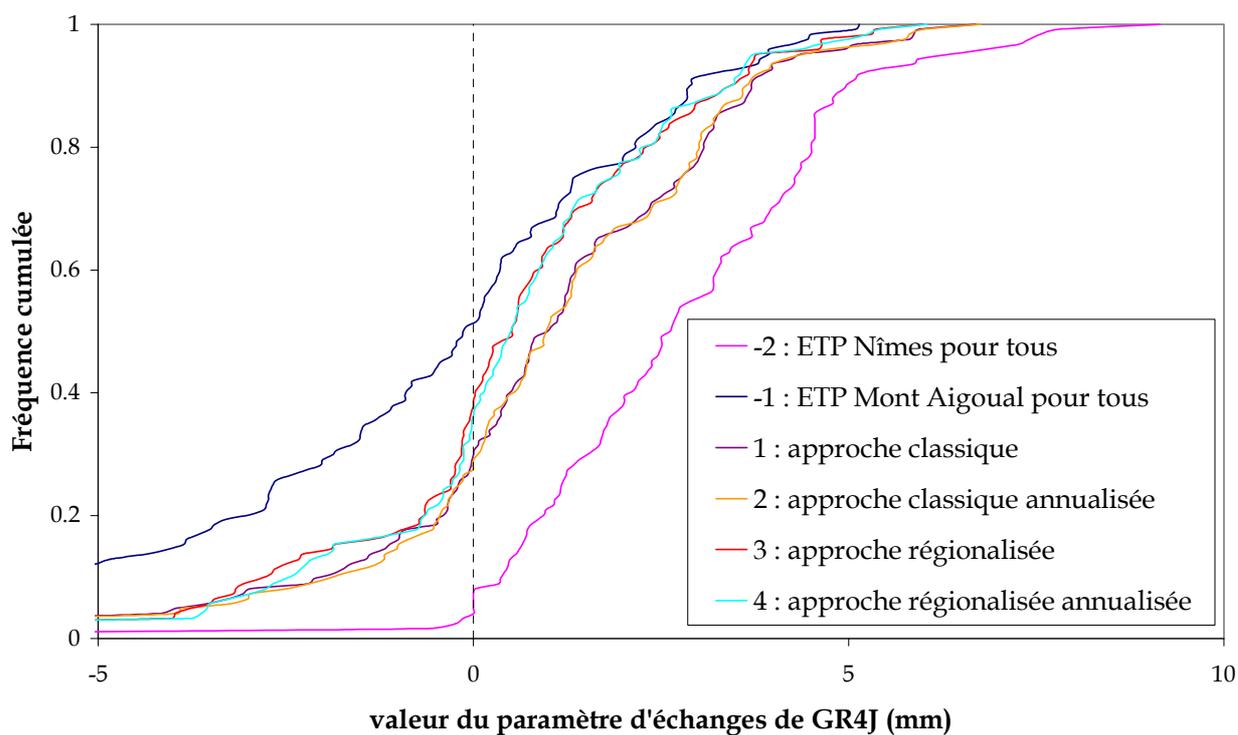


Figure 6.7 : comparaison des différentes méthodes de calcul de l'ETP en termes de distribution des valeurs calées du paramètre d'échange (X3) de GR4J

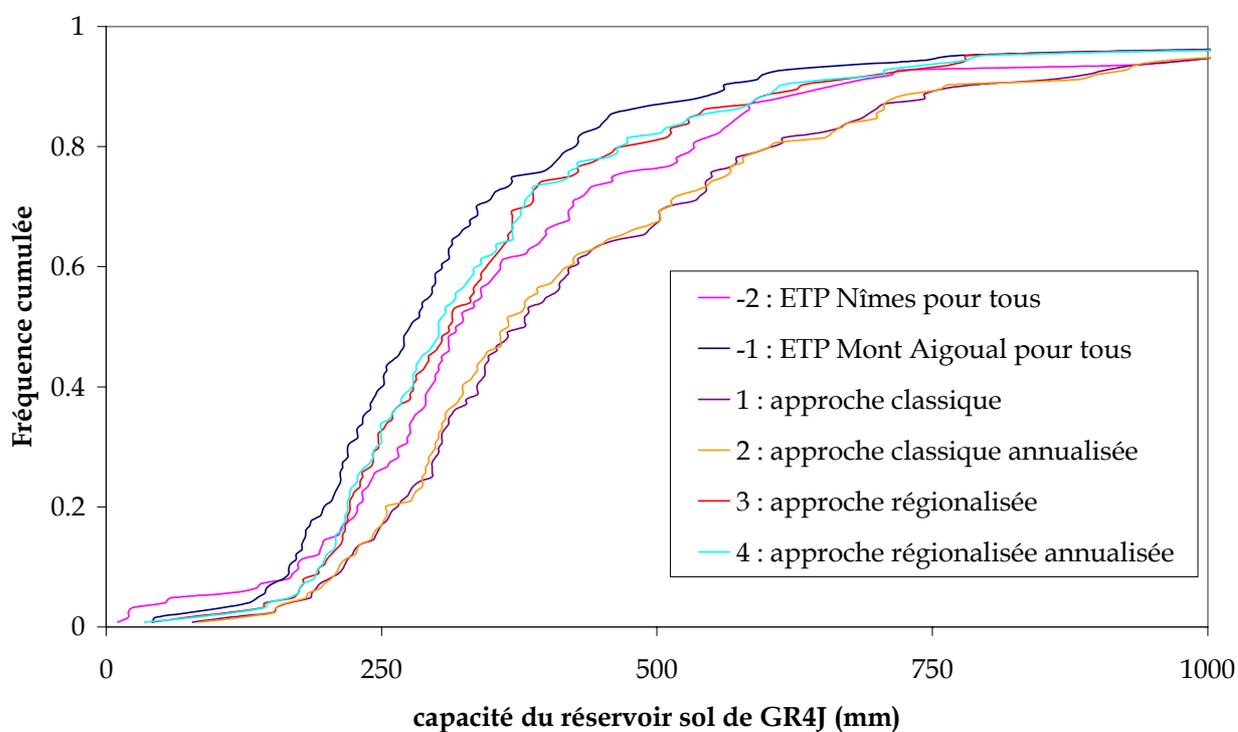


Figure 6.8 : comparaison des différentes méthodes de calcul de l'ETP en termes de distribution des valeurs calées de la capacité du réservoir sol (X2) de GR4J

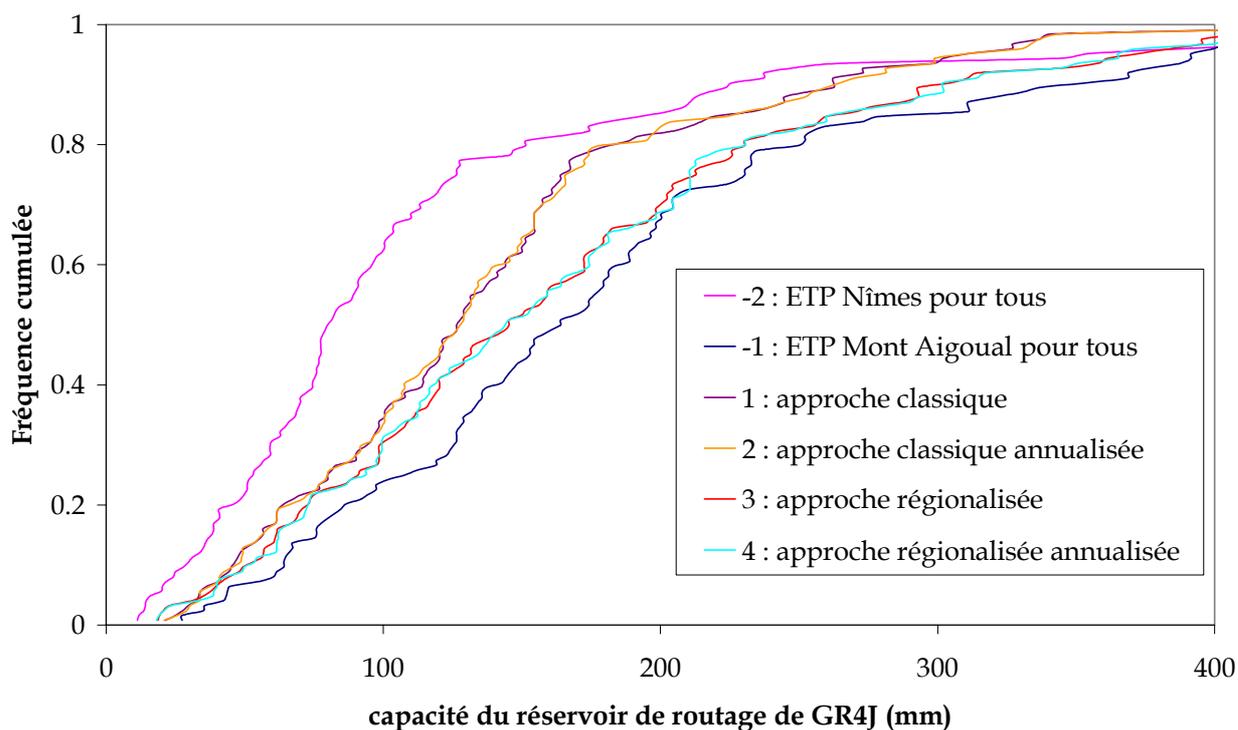


Figure 6.9 : comparaison des différentes méthodes de calcul de l'ETP en termes de distribution des valeurs calées de la capacité du réservoir de routage (X1) de GR4J

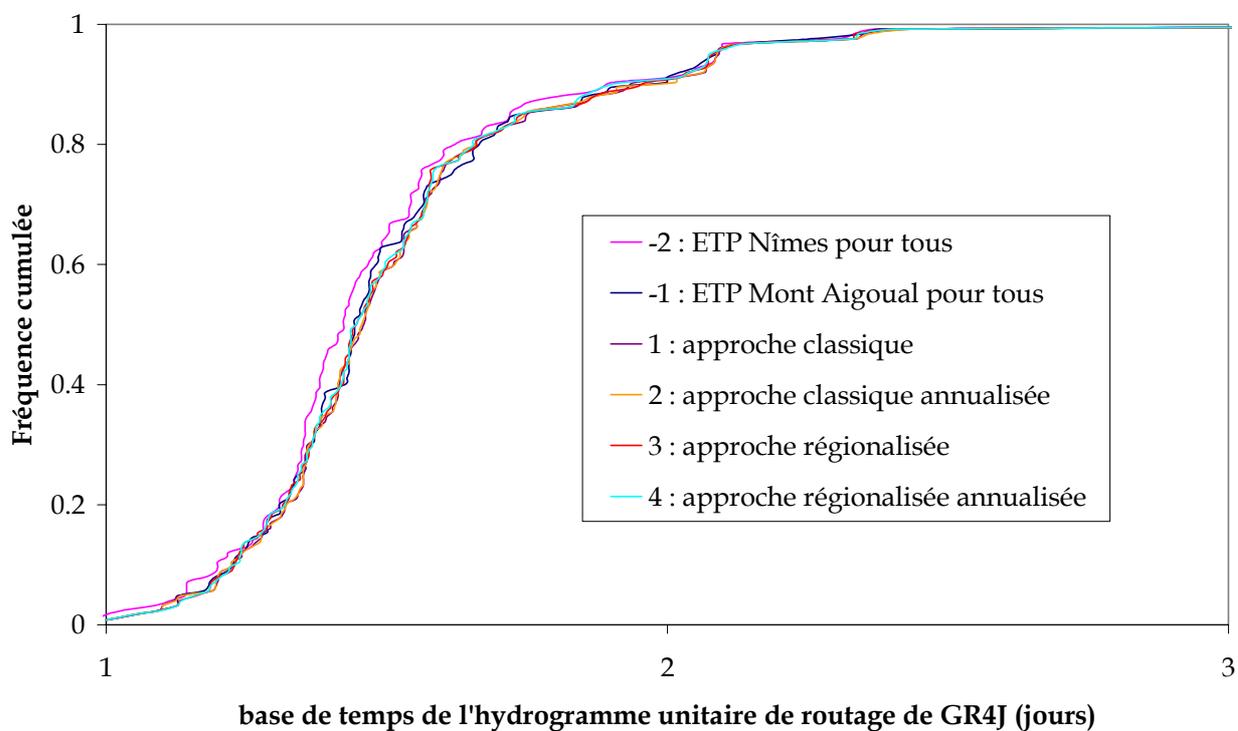


Figure 6.10 : comparaison des différentes méthodes de calcul de l'ETP en termes de distribution des valeurs calées de la base de temps de l'hydrogramme unitaire de routage de GR4J (paramètre X4)

Analysons à présent les conséquences des différents mode d'estimation de l'ETP sur les paramètres de GR4J, en distinguant (comme nous l'avions fait au chapitre 5) paramètres de production et paramètres de transfert.

Impact sur les paramètres de production (X2, X3)

- GR4J utilise son **paramètre d'échange (X3)** pour s'adapter à la demande évaporative brute qui lui est présentée. X3 prend des valeurs positives élevées pour les cas de surestimation nette de l'ETP (cas -2, où l'on a imposé une ETP très forte en entrée à tous les bassins), ce qui correspond à un apport d'eau au bassin. Inversement, la distribution des valeurs obtenues avec l'ETP du Mont Aigoual (sous-estimation de l'ETP des bassins) a pour conséquence des valeurs relativement plus faibles de ce coefficient d'échange (pour 50% des bassins versants, il y a alors une perte nette). On vérifie bien sûr en Figure 6.7 que l'approche « classique », qui utilise les stations synoptiques de basse altitude, se situe du côté de la surestimation de l'ETP. Enfin, on observe que l'approche d'annualisation de l'ETP n'a aucune influence sur la distribution de ce paramètre.
- GR4J modifie également la capacité de son **réservoir de production X2** (réservoir « sol ») : une surestimation de l'ETP se traduit par une capacité plus importante de ce réservoir. Un réservoir plus important permet de garantir un rendement en eau du bassin plus proche de ce qu'il devrait être en l'absence de surestimation, en stockant plus d'eau en hiver (eau compensée par les transferts, qui sont d'autant plus importants que le réservoir de routage est plein, ce qui est le cas en hiver).

Impact sur les paramètres de transfert (X1, X4)

- De façon assez surprenante, l'un des deux paramètres de transfert (X1, la capacité du réservoir de routage) est affecté par une sur- ou une sous-estimation de l'ETP. Notons que nous avons fait la même observation au chapitre 5, lorsque nous examinions les conséquences des biais systématiques sur les pluies. Il est possible d'expliquer ce phénomène de la même façon, par un « report » de la fonction d'échange sur le réservoir de routage, dans la mesure où les échanges sont une fonction de X3 et du niveau d'eau dans le réservoir de routage, c'est à dire de X1 indirectement (Eq. 5.3). En cas de surestimation de l'ETP, GR4J réduit la capacité du réservoir de routage, afin de faciliter l'accession à un niveau de remplissage élevé, qui se traduit par des échanges (des apports) plus importants.
- Enfin, on peut vérifier Figure 6.10 que le temps de réaction du bassin reste très stable et n'est pas affecté par le mode de calcul de l'ETP.

6.7 Conclusion et pistes de recherches supplémentaires

Les résultats de ce chapitre peuvent sembler à première vue décevants, dans la mesure où malgré les bons résultats de l'étude de régionalisation de l'ETP, nous n'avons pas réussi à améliorer les performances du modèle GR4J. Nous avons pu mettre en évidence les mécanismes d'ajustement que GR4J utilise pour compenser une sur- ou sous-estimation de l'ETP, et qui le rendent donc capable de tolérer une estimation assez grossière de cette donnée climatique d'entrée.

Il nous semble cependant qu'il serait souhaitable de continuer à investiguer le problème de la prise en compte de l'ETP dans les modèles pluie-débit. Il nous semble notamment particulièrement important de comprendre :

- si les mécanismes qui permettent au modèle GR4J de s'adapter à une assez large gamme de demande évaporative brute se retrouvent dans les principaux modèles pluie-débit ?
- s'il faut remettre en cause la structure du modèle, notamment la partie traitant l'évaporation ?
- s'il faut remettre en cause la significativité de l'ETP comme variable hydrologique et rechercher parmi les variables climatiques directement mesurables (température, rayonnement) un meilleur facteur explicatif des pertes évaporatives à l'échelle d'un bassin versant ? Les résultats d'Hervieu (2001) semblent bien aller dans ce sens.

CONCLUSION DE LA TROISIEME PARTIE

Les données climatiques de forçage du bassin versant doivent être connues si l'on souhaite analyser son comportement hydrologique. Malheureusement, la variabilité spatiale et temporelle de la pluie et de l'évaporation sur un bassin versant fait que notre connaissance est entachée de nombreuses incertitudes. C'est ce qui a justifié l'analyse conduite aux chapitres 5 et 6, où nous avons essayé de comprendre quelle pouvait être l'influence de ces incertitudes sur un modèle pluie-débit, que nous devons utiliser pour « décoder » le comportement pluie-débit de nos bassins versants.

Plusieurs conclusions s'imposent¹ :

- GR4J semble assez peu sensible aux variations spatiales de l'ETP, car il a la possibilité au travers de sa fonction de production de compenser d'éventuelles sur- ou sous-estimations, tant qu'elles restent dans des limites raisonnables. Il se peut également que le concept d'ETP ne soit pas une entrée très pertinente. Il se peut aussi que l'incertitude sur d'autres entrées (telles que les transferts souterrains) soit prépondérante par rapport à l'incertitude sur la demande évaporative;
- GR4J réagit positivement à une amélioration de la qualité d'estimation de la pluie de bassin (au sens de l'indice GORE), tout en étant moins nettement affecté par la qualité d'estimation du volume total de pluie (au sens de l'indice BILAN).
- corriger un biais dans la mesure de la pluie est extrêmement compliqué : une approche simple avec un coefficient multiplicatif n'améliore pas la performance de GR4J qui a, grâce à la souplesse de sa structure, la possibilité de s'adapter aux erreurs de bilan, comme il avait la possibilité de s'adapter à différentes estimations de l'ETP.

Ainsi, malgré la simplicité et la parcimonie du modèle pluie-débit utilisé, celui-ci s'est révélé remarquablement adaptable. Cette adaptabilité pourrait être considérée comme un défaut, un manque de « sens physique ». En fait, il semble que ce soit l'une des causes de sa robustesse, qualité qui a été recherchée au cours de sa mise au point (Perrin, 2000). Notons qu'il ne faudrait pas confondre adaptabilité et insensibilité, car nous avons montré que GR4J s'adaptait aux différences d'entrée de pluie et d'ETP en utilisant ses paramètres, de façon d'ailleurs très similaire pour ces deux entrées :

¹ Si nous citons le modèle GR4J, c'est uniquement parce que c'est le modèle sur lequel nous avons le plus poussé nos investigations. Les autres modèles utilisés semblent indiquer que les conclusions auxquelles nous sommes arrivées sont d'ordre général.

- les paramètres de production (réservoir « sol » X2 et fonction d'échange X3) sont les premiers sollicités pour équilibrer le bilan en eau du bassin.
- l'un des paramètres de la fonction de transfert (réservoir de routage X1) est également sensible, et nous avons expliqué ce comportement par un report indirect de la fonction d'échange (les échanges sont aussi une fonction du niveau d'eau dans le réservoir de routage). Le second paramètre de transfert (temps de base des hydrogrammes unitaires) reste pour sa part très peu sensible aux différences d'entrée de pluie et d'ETP¹.

L'étude de la bibliographie qui a été réalisée tant pour la pluie que pour l'ETP a montré qu'étrangement, les études de sensibilité menées par les hydrologues négligeaient presque toujours cette adaptabilité. On pourrait d'ailleurs proposer de classer les études de sensibilité en deux catégories : « statiques » et « dynamiques ».

- les *études de sensibilité statiques* sont celles qui explorent la sensibilité des modèles à leurs entrées en optimisant dans un premier temps les paramètres, auxquels on ne touche plus par la suite. La sensibilité du modèle est analysée en comparant les débits simulés avec des entrées « erronées » aux débits simulés avec des entrées « parfaites ».
- les *études de sensibilité dynamiques* ont pour leur part des paramètres optimisés (et des débits simulés) de référence, qui correspondent à des entrées (pluie ou ETP) de référence. Mais lorsque le modèle est utilisé avec des entrées « erronées », on réoptimise le modèle pluie-débit avant de simuler les débits qui devront être comparés aux débits de référence.

Nous pensons que cette classification est intéressante, car elle révèle des différences d'approche fondamentales en modélisation : les *analyses statiques* considèrent les paramètres des modèles comme absolus, qui ont une justification physique, et donc une justification indépendamment de possibles erreurs sur les données d'entrées. Les *analyses dynamiques* traduisent quant à elles une reconnaissance des limites des modèles pluie-débit, et de la dépendance (qui transparaît notamment dans des conditions opérationnelles) qui existe entre paramètres estimés et données climatiques disponibles.

En ce qui concerne l'objectif principal de cette thèse (la détection des tendances), les résultats de la Partie III nous font conclure :

- qu'il est nécessaire d'utiliser en entrée du modèle des séries stationnaires pour le forçage climatique. Cela implique notamment que, **pour décrire la pluie de bassin, il est indispensable de se limiter aux pluviomètres présents sur toute la longueur de la série étudiée.**

¹ Remarque : l'absence d'impact sur les paramètres de routage ne se justifie théoriquement que si la modification quantitative des entrées n'affecte pas leur distribution temporelle. Si on modifiait les entrées de pluie en ne considérant que des pluviomètres amont par exemple, il pourrait être « normal » d'obtenir un paramètre de délai allongé.

- Qu'il semble difficile, voire impossible, de travailler directement sur les paramètres du modèle, dans la mesure où ceux-ci ne représentent aucunement une vérité absolue. Leur valeur est conditionnée par le comportement physique du système, mais aussi par la vision biaisée que nous avons du forçage climatique du bassin versant.

Notons enfin que l'adaptabilité de GR4J démontrée par ces études de sensibilité remet d'une certaine façon en question la notion d'équifinalité avancée par Beven (1993). Par ce terme, Beven fait référence à un défaut de nombreux modèles pluie-débit, probablement lié à leur surparamétrisation, qui fait qu'il existe un grand nombre de jeux de paramètres pour décrire le même comportement hydrologique (nous pensons, grâce à la parcimonie de GR4J, avoir échappé à ce travers). Il nous semble qu'en ce qui concerne la non-unicité des jeux de paramètres décrivant la relation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant¹, ce qui importe réellement c'est la dépendance des valeurs des paramètres par rapport à notre connaissance du forçage climatique.

¹ Cette non unicité est gênante car elle, par exemple, a des conséquences négatives sur les possibilités de régionalisation des paramètres des modèles.

Partie IV - Des indicateurs globaux pour décrire le couvert forestier et son évolution à l'échelle du bassin versant

L'objectif de cette quatrième partie est de parvenir à quantifier l'évolution du couvert forestier sur les bassins versants que nous étudions.

Dans le chapitre 7, nous décrivons les données acquises par l'Inventaire Forestier National (IFN), ainsi que les résultats d'inventaire qui ont été mis à notre disposition : photographies aériennes, cartes, données dendrométriques régionales. Puis nous exposons la méthodologie retenue pour traiter ces données.

Au chapitre 8, nous présentons et analysons les résultats de la combinaison des informations cartographiques et dendrométriques, qui a pu être menée à bien pour une partie de notre échantillon d'étude (34 bassins sur les 63 de notre échantillon complet).

7 COMMENT CARACTERISER L'EVOLUTION DE L'OCCUPATION DES SOLS ?

L'un des objectifs de cette thèse est de caractériser *parallèlement* l'évolution du comportement hydrologique d'un échantillon de bassins versants et l'évolution de son couvert forestier. Pour caractériser le couvert forestier, il nous a semblé important de pouvoir disposer non seulement de l'information relative aux surfaces, mais aussi de descripteurs de la vigueur de la végétation forestière et de la biomasse présente. L'Inventaire Forestier National (IFN) est le seul organisme en France à disposer de ces deux types de données, qu'il a mises à notre disposition.

Dans ce chapitre, nous commençons par présenter le mode d'acquisition des données d'inventaire forestier, dans la mesure où il conditionne assez largement l'utilisation que nous pouvons en faire et la méthode d'exploitation. Ensuite, nous détaillons la méthodologie retenue pour utiliser les données de l'IFN et parvenir à une description globale – à l'échelle du bassin versant – de l'évolution du couvert forestier.

Au chapitre 8, nous présenterons et discuterons les résultats obtenus à l'échelle des régions forestières et des bassins versants.

7.1 Données cartographiques et dendrométriques acquises par l'IFN

7.1.1 Base géographique de l'inventaire

Pour mener à bien sa mission d'« *inventaire permanent des ressources forestières nationales* », l'IFN réalise un échantillonnage statistique des peuplements, qui s'appuie sur une division du territoire national en Régions Forestières¹. La Figure 7.1 présente le découpage de la France selon ces régions forestières. Les résultats statistiques de l'IFN sont disponibles à l'échelle des régions forestières, ainsi que pour une subdivision départementale² de ces régions, généralement connue sous l'abréviation RegD.

¹ L'IFN appelle « Région Forestière » une division territoriale, si possible traditionnellement reconnue, où règnent en moyenne des conditions similaires ou équivalentes du point de vue forestier et qui présente généralement des types de forêts ou des types de paysage comparables. L'étude et la délimitation des régions forestières de France ont été réalisées par l'IFN lors du premier cycle d'inventaire des départements français, les limites étant tracées indépendamment des limites administratives (départements, cantons, communes).

² En réalité, les résultats peuvent encore être ventilés selon les classes de propriété, mais nous n'avons pas utilisé cette possibilité.



Figure 7.1 : découpage de la France en 309 régions forestières par l'IFN (source : IFN)

7.1.2 Déroutement de l'inventaire

Préalablement au déroulement de l'inventaire, il est nécessaire de délimiter sur une carte au 1:25 000 le domaine d'étude (régions forestières, types de propriété, types de formation). L'inventaire est ensuite réalisé par département, en trois phases (Chevrou, 1988):

- **Première phase** : sondage systématique ou pseudo-systématique de points sur le territoire inventorié. En règle générale, ce sondage est effectué par application d'une grille de points sur une photographie aérienne. Les formations à inventorier sont ensuite photo-interprétées, classées, et une première évaluation de leur importance est faite.
- **Deuxième phase** : sondage aléatoire stratifié à l'intérieur de l'échantillon de 1^{ère} phase, contrôle au sol et actualisation des résultats de 1^{ère} phase, évaluation à la date du contrôle de l'importance des formations inventoriées.
- **Troisième phase** : sélection des points de 2^{ème} phase situés dans une formation boisée ou arborée à inventorier, description et mesure sur le terrain de différentes caractéristiques dendrométriques et écologiques des formations et des arbres présents : structure, composition en essences, nombre d'arbres, surface terrière, volumes, accroissements, dimensions, âge, sol, humus, espèces floristiques, etc.

Les 2^{ème} et 3^{ème} phases sont en fait simultanées (leurs échantillons sont en partie communs). La Figure 7.2 présente de façon schématique la succession des opérations d'inventaire.

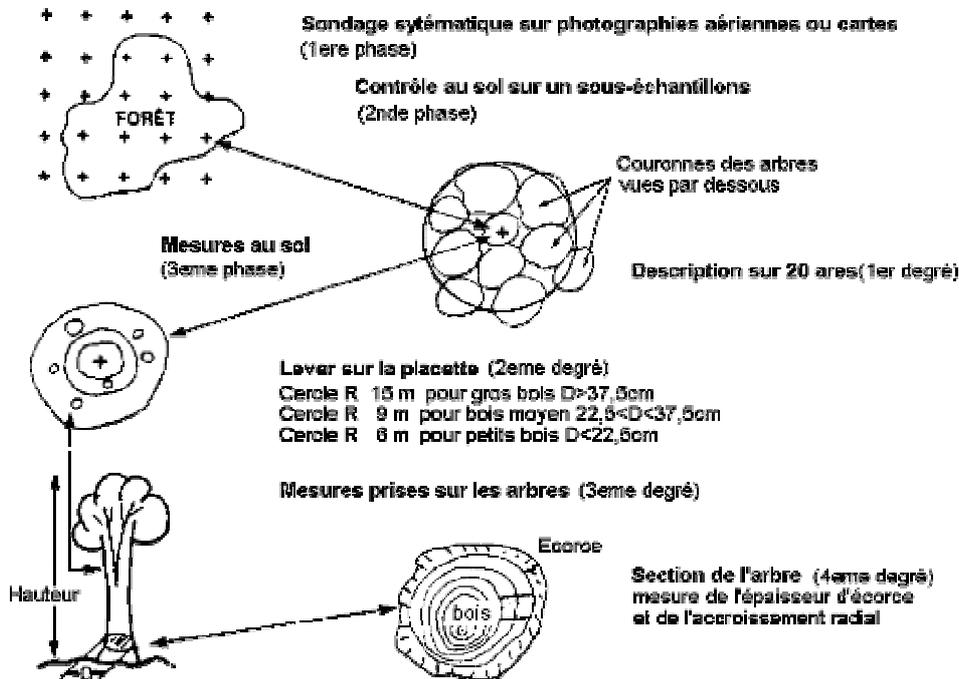


Figure 7.2 : schéma simplifié des opérations d'inventaire forestier (source : IFN)

La méthode d'inventaire utilisée par l'IFN consiste donc en un sondage par points et non par arbres ou par parcelles (dont les populations sont trop mal connues), ou encore par unités cartographiées (absentes aux débuts de l'IFN). Les points sont échantillonnés dans un espace bidimensionnel continu (plan de la projection Lambert) et les grandeurs extensives (surfaces, volumes, accroissements, etc.) sont estimées par sommation pondérée des valeurs mesurées sur les points de sondage. Plus précisément, ce sont les densités surfaciques qui sont mesurées dans un voisinage de chaque point appelé placette. Les coefficients de pondération sont appelés surfaces ou longueurs d'extension et sont calculés de manière à éliminer les biais d'estimation.

7.1.3 Périodicité de l'inventaire

Environ 10 années séparent le passage des équipes d'inventaire dans un même département. Lors de la réalisation de notre recherche, les résultats d'inventaire étaient disponibles pour trois cycles successifs dans chacun des départements du Massif central (Tableau 7.1). Notre évaluation de l'évolution du couvert forestier des bassins versants peut donc s'appuyer sur trois mesures.

Tableau 7.1: dates de réalisation des trois inventaires forestiers dans les départements du Massif central (date des photographies¹)

Département	1 ^{er} Cycle	2 ^{ème} Cycle	3 ^{ème} Cycle
3 Allier	1960	1975	1985
7 Ardèche	1969	1979	1991
11 Aude	1964	1976	1986
12 Aveyron	1966	1978	1991
15 Cantal	1963	1975	1987
19 Corrèze	1959	1977	1988
23 Creuse	1959/60/61	1978	1989
30 Gard	1970	1979	1990
34 Hérault	1971	1981	1992
42 Loire	1965	1979	1990
43 Haute-Loire	1963	1977	1987
48 Lozère	1963	1977	1989
63 Puy-de-Dôme	1962	1974	1986
69 Rhône	1965	1979	1990
81 Tarn	1964	1977	1987
82 Tarn-et-Garonne	1959	1976	1987
87 Haute-Vienne	1959/60	1978	1989

7.1.4 Organisation administrative de l'inventaire

L'IFN a réparti les départements du territoire métropolitain entre cinq échelons (Figure 7.3). Chaque échelon possède ses équipes de terrain et sa photothèque, où sont conservées les photographies aériennes ayant servi à la réalisation de l'inventaire. Pour réaliser la cartographie de 34 bassins, nous avons surtout travaillé avec l'échelon de Montpellier, également avec l'échelon de Bordeaux.

La base de données dendrométriques de l'IFN est gérée de façon centralisée, par le Centre d'Evaluation de la Ressource à Montpellier.

¹ Les missions de photographie aérienne et les levés de terrain sont souvent séparés d'une ou deux années. Il est donc nécessaire de préciser quelle date est prise en compte.

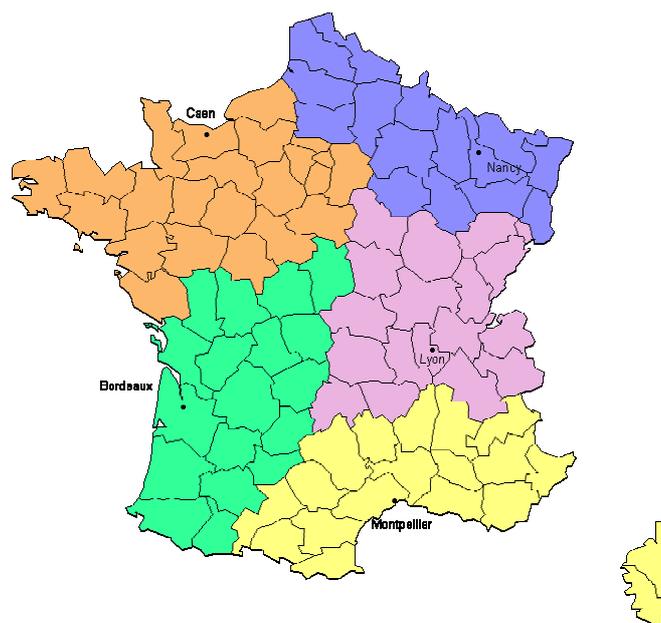


Figure 7.3 : répartition des départements entre les 5 échelons de l'IFN

7.1.5 Disponibilité des données

Les photographies aériennes sont disponibles pour chacun des cycles d'inventaire. Pour les cycles les plus récents (3^{ème} et parfois 2^{ème} inventaire), les couvertures aériennes sont constituées de photographies infra-rouge couleur (IRC), dont l'échelle approximative est le 1 : 17 000 ou le 1 : 20 000. Pour les cycles les plus anciens, on trouve selon les départements une variété de prise de vues (IRC, infra-rouge N&B, ou panchromatiques N&B) dont l'échelle peut varier du 1 : 15 000 au 1 : 25 000.

Les données dendrométriques ne sont malheureusement pas toujours disponibles dans le détail au 1^{er} cycle d'inventaire (les fichiers informatiques les plus anciens ayant été perdus). Dans ce cas, on s'est appuyé sur des données départementales globales ou sur des données de la même région forestière dans un autre département pour estimer les valeurs des paramètres dendrométriques¹. Le Tableau 7.2 récapitule l'état de disponibilité des trois types de données de l'IFN que nous avons utilisés.

Tableau 7.2 : Disponibilité des données forestières de l'Inventaire Forestier National pour l'analyse de l'évolution du couvert forestier

Période	Photographies aériennes	Données cartographiques	Données Dendrométriques
Cycle 1 (1960-70)	disponibles	-	suivant département
Cycle 2 (1970-80)	disponibles	-	disponibles
Cycle 3 (1980-90)	disponibles	disponibles	disponibles

¹ Le détail des approximations ou reconstitutions réalisées est présenté en annexe IV.3.

Notons enfin qu'au cours des 40 années d'existence de l'IFN, les protocoles d'échantillonnage ainsi que leur mise en oeuvre ont varié, de telle sorte qu'il est très difficile d'exploiter la base de données dendrométrique sans l'assistance de ses gestionnaires¹.

7.2 Méthodologie retenue pour utiliser les données de l'IFN

Pour quantifier le couvert forestier de chaque bassin versant, nous avons choisi de réaliser une cartographie simplifiée par photo-interprétation, pour chacun des cycles d'inventaire. Nous avons ensuite combiné les estimations surfaciques avec des données statistiques dendrométriques disponibles à l'échelle des Régions Forestières Départementales, pour caractériser globalement le couvert forestier du bassin versant.

Les raisons de ce choix sont multiples :

- d'une part, il faut rappeler qu'il n'existe pas de carte du peuplement forestier produite par les photo-interprètes de l'IFN pour l'ensemble des cycles d'inventaire (cette cartographie n'existe sous forme numérique que pour le troisième cycle d'inventaire²). Il nous fallait donc réaliser cette cartographie nous-même.
- d'autre part, il faut mentionner que nos bassins versants sont de faible taille, de telle sorte qu'il n'était pas envisageable d'obtenir les caractéristiques du couvert forestier par traitement des points d'échantillonnage situés à l'intérieur du bassin³.

7.2.1 Cartographie des peuplements par bassin versant

Comme nous l'avons précisé, nous ne disposons de cartes (numériques) des peuplements forestiers que pour le cycle d'inventaire le plus récent (le troisième).

Pour limiter au maximum les biais d'interprétation, nous avons choisi de mettre au point une méthode qui permette de remonter vers le passé (2^{ème} et 1^{er} cycles d'inventaire) en utilisant au mieux le fond cartographique existant pour le 3^{ème} cycle et les photographies aériennes des 2^{ème} et 1^{er} cycles. Nous avons donc réalisé, à partir des photographies aériennes disponibles pour les trois cycles, une mosaïque orthorectifiée (pour plus de détail sur la réalisation de ces mosaïques, on se référera à l'article de Muraz et al., 1999, reproduit en annexe IV.1).

A partir de cette orthophotographie couvrant l'ensemble du bassin versant, il a été possible de modifier les contours des peuplements forestiers, sur la base du fichier du troisième cycle de l'IFN. Pour cette étape de « rétro-interprétation », nous avons

¹ Nous avons bénéficié de la bienveillante assistance des ingénieurs de la Cellule d'Évaluation de la Ressource de l'IFN à Montpellier.

² Elle existe de façon exceptionnelle pour le second cycle dans le département de l'Hérault.

³ D'autant plus que le problème du secret statistique touchant la localisation des points d'échantillonnage se serait posé.

Chapitre 7 : Comment caractériser l'évolution de l'occupation des sols ?

utilisé une nomenclature notablement simplifiée en classes. Cette simplification se justifie 1) par le fait que nous n'avons pas l'expérience de photo-interprètes professionnels, 2) parce que la mosaïque numérique n'a pas la précision du grain du papier photo et 3) parce qu'en l'absence de couples stéréographiques, nous n'avions plus accès au relief et à la hauteur des peuplements, ce qui limitait nettement les possibilités d'interprétation.

Des classes simplifiées ont donc été définies pour la classification du couvert végétal. Ce sont :

- A - Agricole (catégorie hors thème de l'IFN)
- L - Lande
- FO - Forêt ouverte
- FM - Forêt mixte
- FF - Forêt de feuillus
- FC - Forêt de conifères

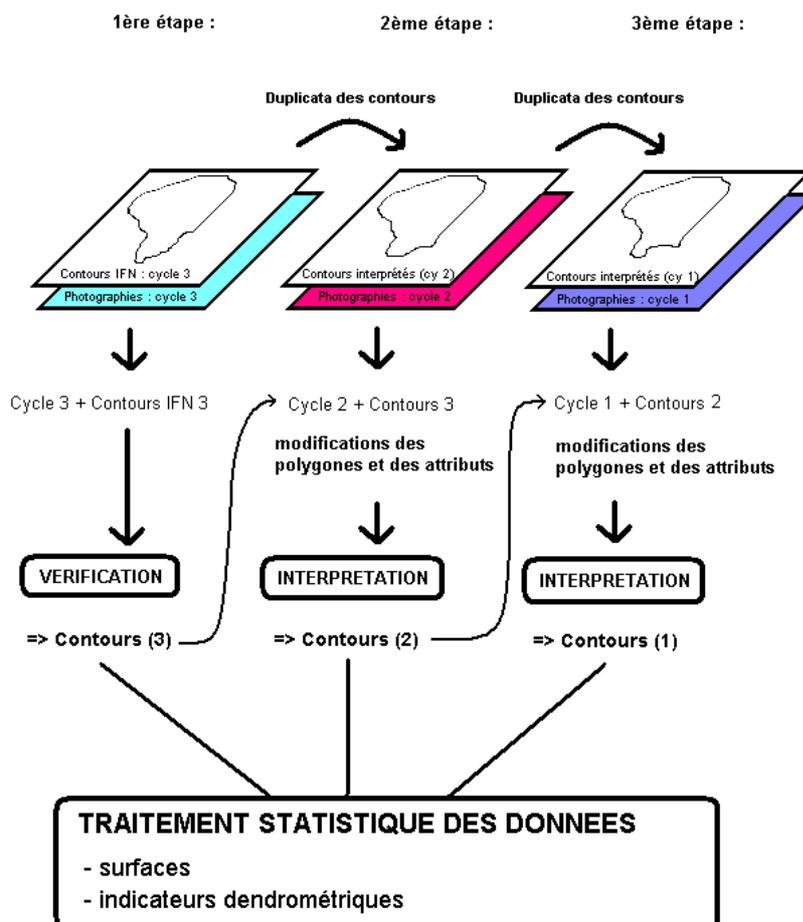


Figure 7.4 : méthode de photo-interprétation régressive du couvert forestier

La Figure 7.4 résume les étapes de l'interprétation des deux premiers cycles d'inventaire, sur la base du travail réalisé par l'IFN pour le 3^{ème} cycle : on superpose

l'orthophotographie du cycle antérieur avec les contours du cycle plus récent; et on modifie un à un les polygones, si il y a lieu. Toute modification de polygone fait l'objet d'une vérification sur les trois cycles étudiés (2 au minimum). En effet, on ne souhaite pas modifier le tracé d'un polygone si la différence photo/contours est la même sur le 3^{ème} cycle (qui constitue notre référence).

7.2.2 Réalisation pratique de l'interprétation

La réalisation des ortho-photographies des 34 bassins versants traités s'est échelonnée sur près de trois ans (1998 à 2000). Si nous avons mis au point nous même la méthode et dirigé sa mise en oeuvre, l'essentiel du travail pratique¹ a été réalisé par Julien Muraz et Mamoutou Tangara au Cemagref d'Antony. L'interprétation a été faite sur le logiciel SIG ArcView.

A l'issue de ce travail d'interprétation, nous disposons d'une cartographie des formations végétales pour chaque bassin versant, et à trois dates successives, correspondantes aux cycles 1, 2 et 3 de l'Inventaire Forestier National. Les surfaces occupées respectivement par chaque type de peuplement sur le bassin versant sont connues, elles peuvent être croisées avec les caractéristiques de densité de ces peuplements, pour nous permettre de calculer trois *descripteurs dendrométriques globaux du couvert forestier du bassin versant*.

7.2.3 Choix de descripteurs dendrométriques potentiellement pertinents pour l'hydrologie

Nous présentons dans cette section quelques définitions utiles pour préciser ce que nous appelons descripteurs dendrométriques. Puis, nous présentons une rapide revue de la littérature scientifique sur le thème des descripteurs dendrométriques utiles pour l'hydrologie.

- *Définitions (d'après Pardé et Bouchon, 1988)*

- **Biomasse** : la biomasse d'un arbre correspond au poids sec de la totalité de l'arbre (racines, tronc, branches, feuilles).

- **Volume** : le volume d'un arbre est évalué selon un mode de cubage (à l'aide des mesures de hauteur, longueur, diamètre ou circonférence). Il correspond au volume exploitable de l'arbre pour le bûcheron.

- **Surface foliaire** (*leaf area*) : la surface foliaire correspond à la surface de l'ensemble des feuilles d'un arbre. L'indice foliaire (*leaf-area index* ou L.A.I.) correspond à la surface foliaire rapportée à la surface horizontale au sol correspondante. Notons qu'il s'agit de surface des feuilles simple (c'est à dire une seule face) pour tous les feuillus et les résineux connus comme n'ayant de

¹ La cartographie des 34 bassins versants a nécessité la production de 112 ortho-photographies résultant de l'assemblage de plus d'un millier de photographies aériennes préalablement orthorectifiées. Au total, près de deux mille photographies aériennes ont été fournies par l'IFN et scannées au Cemagref.

stomates que sur une face (ex : sapin pectiné) ; de surface doubles dans le cas contraire (la majorité des résineux).

. **Surface terrière** (*basal area*) : on appelle surface terrière d'un arbre la surface de la section transversale de cet arbre à hauteur d'homme (soit 1.30 m). La surface terrière d'un peuplement est la somme des surfaces terrières de tous les arbres qui le composent.

. **Accroissement** (*increment*) : l'accroissement peut se définir par rapport au volume ou par rapport à la surface terrière. A l'IFN, il est relatif aux cinq années précédant l'inventaire. Nous utilisons l'accroissement en volume, obtenu via une formule de cubage.

. **Surface en aubier** (*sapwood area*) : l'aubier est la partie du bois transportant la sève brute, des racines vers les feuilles. La surface en aubier est utilisée pour estimer la capacité d'évaporation d'un arbre.

▪ Utilisation des descripteurs forestiers par les hydrologues

Concernant l'utilisation de données dendrométriques pour des études hydrologiques, nous avons tiré de la littérature hydrologique et forestière les références suivantes :

- Eschner et Satterlund (1966) ont utilisé la surface terrière pour caractériser l'évolution de la couverture forestière d'un bassin versant et le lier aux changements hydrologiques observés sur une chronique de débits.
- Calder et al. (1993) ont montré qu'il existait une relation linéaire entre la surface terrière d'un peuplement et son évapotranspiration ($Et = 0.66 \cdot G$, avec G : surface terrière en m^2ha^{-1} et Et en mmj^{-1})¹. Concernant le lien entre accroissement en volume et évapotranspiration, Calder (1992) a fait l'hypothèse d'une relation linéaire.
- Roberts et al. (2001) ont effectué des mesures directes de transpiration (à la fin de l'été) sur des peuplements d'*Eucalyptus sieberi* (L. Johnson) d'âges variés, et ont recherché des éléments dendrométriques permettant de caractériser la transpiration. Pour l'espèce qu'ils étudiaient, ils ont montré que l'indice foliaire et la vitesse de montée de la sève variaient peu avec l'âge des peuplements. En revanche, la surface d'aubier varie avec l'âge, et elle est donc à l'origine des variations de transpiration². Pour *Eucalyptus sieberi*, les auteurs constatent que le diamètre de l'arbre est un très bon descripteur tant pour la surface d'aubier que pour l'indice foliaire (il permet de prédire 94% de la variation en surface d'aubier et 96% de la variation en indice foliaire) :

¹ Les résultats rapportés par Calder considèrent que l'alimentation en eau n'est pas limitante.

² Dans ce cas précis, on observe une diminution de la surface d'aubier avec l'âge, et donc une baisse de la transpiration du peuplement (de 2.2 mm/j pour un peuplement âgé de 14 ans à 0.8 mm/j pour un peuplement âgé de 160 ans). Il ne semble pas qu'une telle diminution soit observée sur des espèces autres que l'*Eucalyptus*.

$$\log[\text{surface foliaire (m}^2\text{)}] = 1.91 \log[\text{diamètre du tronc (cm)}] - 1.14 \quad \text{Eq. 7.1}$$

$$\log[\text{surface aubier (cm}^2\text{)}] = 1.20 \log[\text{diamètre du tronc (cm)}] + 0.12 \quad \text{Eq. 7.2}$$

On peut donc en déduire que la surface terrière du peuplement est un bon descripteur de cette surface et donc de la transpiration du peuplement.

Remarque : les équations ci-dessus concernent des arbres et non pas des peuplement (la baisse de la surface foliaire avec l'âge du peuplement s'explique par une baisse de la densité plus rapide que la croissance en diamètre).

- Cornish et Vertessy (2001) ont travaillé sur les petits bassins versants expérimentaux de Karuah. Ils ont cherché à y identifier les principales variables explicatives de la diminution du rendement en eau de ces bassins, en relation avec la repousse de la forêt. Les auteurs ont exploré l'accroissement (accroissement annuel de surface terrière), la surface terrière, la surface foliaire et la profondeur du sol (qui traduit la disponibilité en eau). Leurs résultats montrent que le facteur prédominant est, de loin, la profondeur du sol, suivi de la surface foliaire puis seulement de la surface terrière.

Les travaux exposés ci-dessus montrent qu'il n'existe pas de descripteur forestier « clé » unique pour étudier l'hydrologie des forêts, la physiologie des arbres forestiers étant extrêmement complexe. Il nous faudra donc essayer de prendre en compte tous les paramètres disponibles à l'IFN, sans sélection *a priori*.

7.2.4 La base de données dendrométriques de l'IFN

La base de données dendrométriques de l'IFN rassemble la majeure partie des données « brutes » (les résultats des relevés sur le terrain). Ces levés de terrain comprennent la description générale de placettes forestières dans un rayon d'étude de 25 m centré sur un point d'échantillonnage bien localisé (environ 1500 par département), l'analyse globale de chaque essence forestière sur chaque placette (entre 1 et 10 par placette) et l'ensemble des mesures de dimensions effectuées sur les arbres présents sur la placette, dans un rayon maximal de 15 m (de un à vingt cinq arbres recensés par placette). Au total, 268 000 placettes (près de trois millions d'arbres) sont ainsi décrits dans cette base.

Nous avons exploité la base de données dendrométriques de l'IFN dans l'objectif de dériver, pour chacune des cinq catégories forestières retenues et pour chacun des cycles d'inventaire, des valeurs moyennes de volume à l'hectare, d'accroissement moyen à l'hectare et de surface terrière à l'hectare. L'objectif final est, pour chaque bassin et pour chaque cycle d'inventaire, de caractériser globalement la couverture forestière du bassin (c'est à dire, d'obtenir pour chaque bassin et pour chaque cycle d'inventaire une valeur de volume au km², d'accroissement moyen au km² et de surface terrière au km²).

L'utilisation de cette base de données sur un territoire différent de la région forestière départementale n'est pas chose facile. Il faut en effet calculer les paramètres à l'hectare cartographié, puis multiplier ces paramètres par la surface cartographiée interceptée par le BV. Cela pose un certain nombre de problèmes :

1. Les paramètres à l'ha cartographié devraient concerner la totalité des formations boisées... or on ne connaît volume, accroissement et surface terrière que sur les Formations Boisées de Production (FBP) inventoriées. On doit donc faire une première approximation en ne tenant pas compte de ce que l'IFN appelle « autres formations boisées » (sans rôle de production).
2. Il se trouve également que même au sein des FBP, toutes n'ont pas été inventoriées. On doit donc dans certains cas faire des hypothèses sur les FBP non inventoriées.
3. Enfin, les inventaires les plus anciens n'ont pas été accompagnés de cartographie. Dans ce cas, on a des valeurs totales de volume, d'accroissement, de surface terrière ... mais pas les surfaces cartographiées correspondantes. Il faut alors estimer ces dernières en faisant une hypothèse de stabilité pour le ratio SBP/surface cartographiée du cycle suivant.

La correspondance entre bassins versants et régions forestières départementales est présentée en Annexe IV.2, et les résultats dendrométriques de chaque région sont présentés en Annexe IV.3.

7.3 Conclusion sur la méthodologie et les bases de données exploitées

En mettant au point la méthodologie présentée dans ce chapitre, notre objectif était d'effectuer une estimation aussi objective que possible de l'évolution du couvert forestier de nos bassins versants. Etant donné le caractère rétrospectif de notre démarche, nous avons été forcés de nous restreindre à l'exploitation de données acquises par d'autres. La base de données de l'IFN étant de loin la plus riche, nous avons donc choisi de l'exploiter au mieux. Pour ce qui est de la cartographie, nous avons cherché dans la démarche retenue à limiter au maximum les biais liés à la partialité de l'observateur, en choisissant de pratiquer une actualisation rétrospective des cartes plutôt qu'une nouvelle cartographie à chaque cycle. Pour l'estimation des paramètres dendrométriques, nous avons exploité la base de données dendrométriques de l'IFN avec l'aide de la Cellule d'Estimation de la Ressource, en essayant de tenir compte de toutes les particularités d'un échantillonnage dont l'objectif premier était la détermination de réserve de bois exploitables par l'industrie (et non la caractérisation de la biomasse dans toutes les classes du couvert forestier).

La principale source d'incertitude dans notre estimation réside dans le fait que les paramètres dendrométriques sont estimés régionalement, les caractéristiques locales du couvert du bassin versant pouvant différer dans une certaine mesure des moyennes régionales.

Partie IV – Indicateurs du couvert forestier à l'échelle du bassin versant

Malgré ses limites, nous pensons que notre approche fournit des éléments objectifs pour juger de l'évolution des caractéristiques du couvert forestier à l'échelle du bassin versant.

8 OBTENTION D'INDICES GLOBAUX D'EVOLUTION DU COUVERT FORESTIER A L'ECHELLE D'UN BASSIN VERSANT

8.1 Génération d'un indicateur global

Nous avons retenu trois caractéristiques dendrométriques de l'IFN comme descripteurs potentiellement intéressants pour l'hydrologie : volume à l'hectare, accroissement moyen à l'hectare et surface terrière à l'hectare.

L'évolution du couvert forestier à l'échelle du bassin versant peut résulter de changements :

- de la surface forestière totale ;
- des surfaces par types de peuplements ;
- des caractéristiques dendrométriques des peuplements (densité, accroissement) ;
- ou d'une combinaison de ces trois phénomènes.

Les deux premiers types d'évolution sont quantifiés lors de la cartographie. Quant à l'évolution des caractéristiques des peuplements, elle est estimée à partir de la base de données dendrométriques de l'IFN. Les données cartographiques et dendrométriques doivent ensuite être croisées pour constituer un indice global d'évolution du couvert forestier (Figure 8.1).

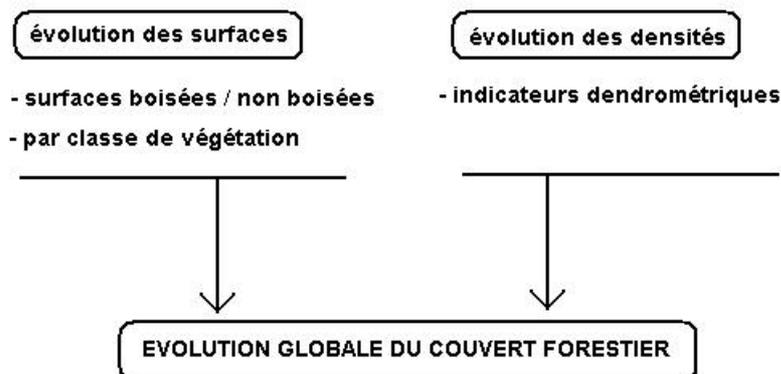


Figure 8.1 : croisement de données cartographiques et dendrométriques pour obtenir un indice global d'évolution du couvert forestier

Dans les sections suivantes, nous commençons par une revue des évolutions surfaciques puis dendrométriques sur la zone d'étude au cours des trois cycles d'inventaire étudiés. Nous présentons et analysons ensuite les résultats du croisement, cette fois-ci à l'échelle de bassins versants.

8.2 Analyse de l'évolution des paramètres dendrométriques sur 25 régions forestières départementales du Massif central

Nous passons à présent à l'analyse des données dendrométriques à l'échelle des régions forestières départementales (RegD), présentées de façon détaillée en Annexe IV.3. Notre analyse porte sur les trois types de couvert sur lesquels nous disposons d'informations réellement fiables : les forêts mixtes (FM), les forêts de feuillus (FF) et les forêts de conifères (FC), et concerne les trois paramètres dendrométriques suivis : le volume sur pied (Figure 8.2), l'accroissement annuel (Figure 8.3), et la surface terrière (Figure 8.4).

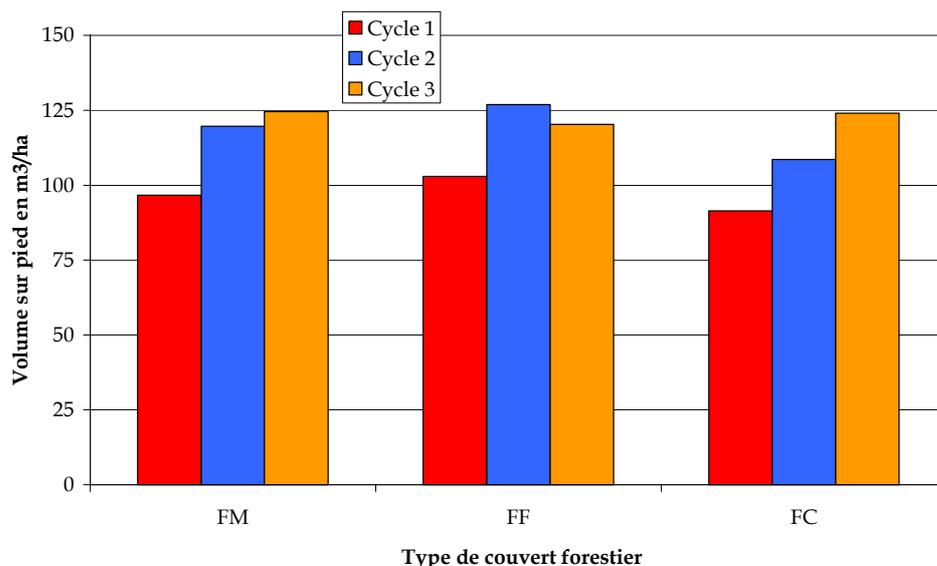


Figure 8.2 : évolution du volume sur pied à l'hectare dans les trois types de couvert forestier dense (moyenne sur 25 RegD du Massif central)

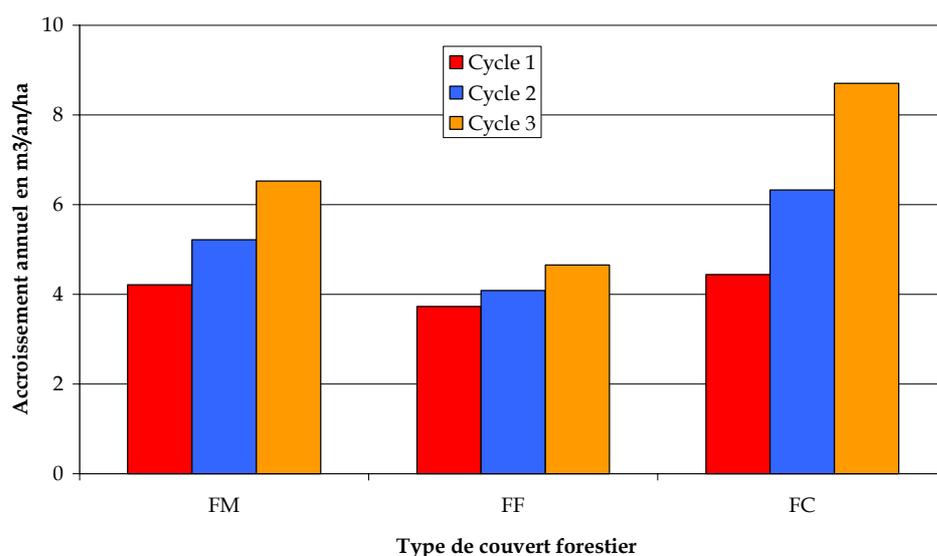


Figure 8.3 : évolution de l'accroissement annuel dans les trois types de couvert forestier dense (moyenne sur 25 RegD du Massif central)

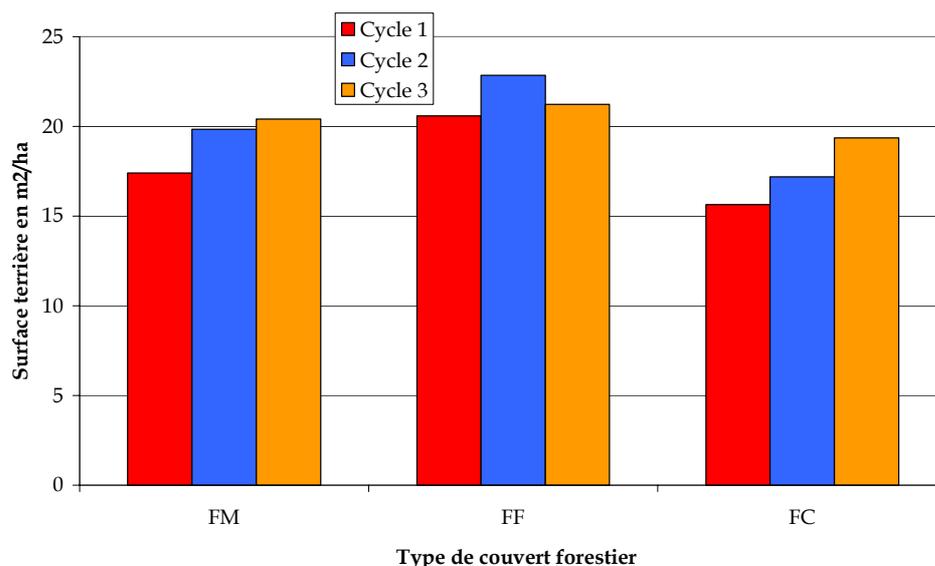


Figure 8.4 : évolution de la surface terrière à l'hectare dans les trois types de couvert forestier dense (moyenne sur 25 RegD du Massif central)

Les tendances sont très comparables pour les trois variables dendrométriques et pour les trois types forestiers : on observe une augmentation constante au cours du temps, correspondant à une densification des peuplements. Seuls les peuplements feuillus paraissent relativement stables, pour ce qui est du volume et de la surface terrière. On peut en déduire qu'au cours de la période étudiée les forêts du Massif central ont produit plus de bois que les forestiers n'en ont exploité, tout en conservant une croissance très dynamique.

8.3 Analyse de l'évolution des surfaces forestières sur 34 bassins versants du Massif central

L'annexe IV.4 présente le tableau détaillé des évolutions des surfaces forestières sur 34 bassins versants de notre échantillon. Rappelons que ces surfaces sont issues de la photo-interprétation des photographies aériennes de l'IFN. En Figure 8.5, on a présenté les principales tendances globales observables.

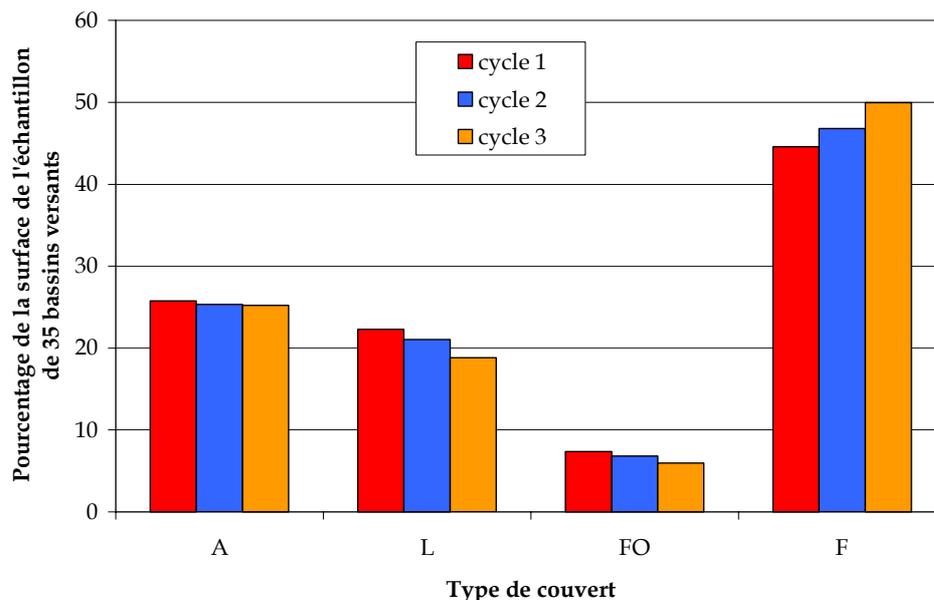


Figure 8.5 : évolution des pourcentages de bassin versant occupés par un type de couvert (A : agriculture, L : lande, FO : forêt ouverte, F : autres types forestiers)

Pour les 34 bassins versants traités sur le plan forestier, il apparaît que l'agriculture, les landes et la forêt ouverte sont en recul constant sur les trois cycles. Il en résulte une croissance nette du couvert forestier « dense », qui passe de moins de 45% de la surface totale à 50%.

Il existe bien sûr une variabilité au sein de notre échantillon. Ainsi, si l'on s'intéresse à l'évolution du couvert forestier « dense¹ » entre le 1^{er} et le 3^{ème} cycle d'inventaire, la moyenne est égale à +15%, la médiane à 9% et l'écart type est égal à 26%. On constate sur la Figure 8.6, que cette variabilité est liée au taux de couvert forestier dense initial : les plus fortes augmentations (supérieures à 25%), et les quelques rares diminutions affectent des bassins versants dont le couvert initial en forêt « dense » est inférieur à 50%.

¹ Le couvert « dense » correspond aux types forestiers moins forêt ouverte et lande.

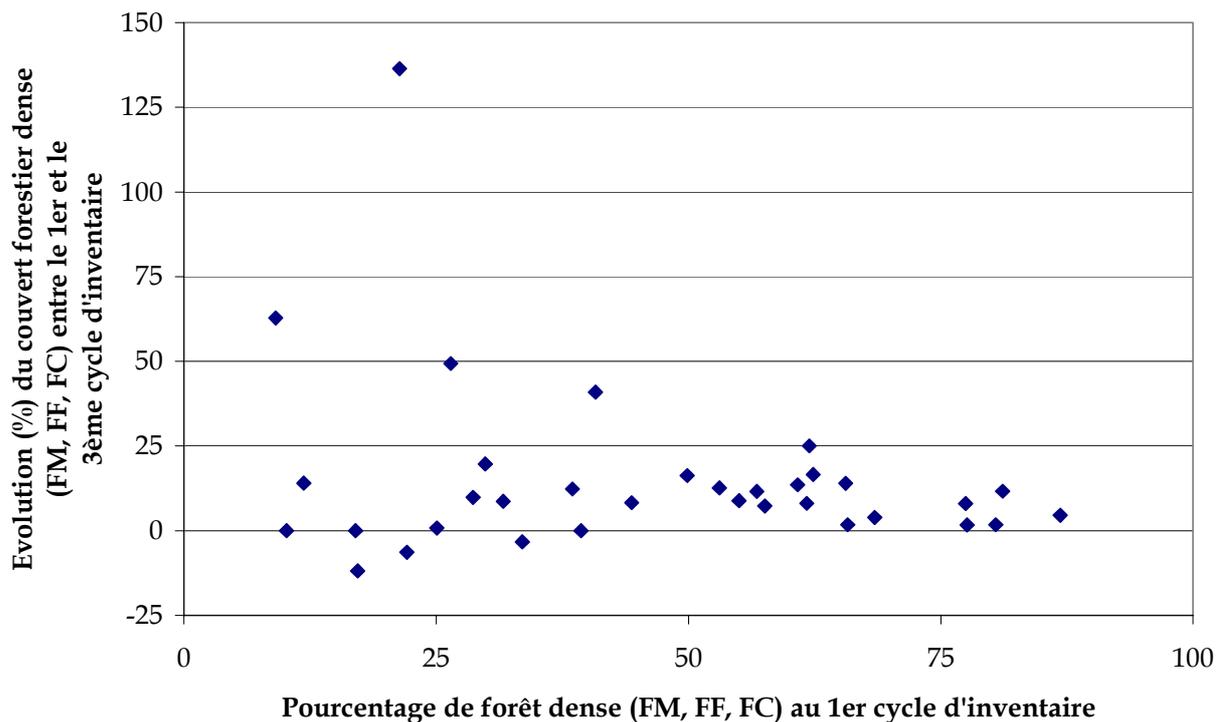


Figure 8.6 : évolution du couvert forestier dense en fonction du couvert initial pour l'échantillon de 34 bassins versants du Massif central

8.4 Analyse de l'évolution des paramètres d'évolution du couvert forestier sur notre échantillon de bassins versants

Passons à présent à l'analyse des données dendrométriques globales à l'échelle des bassins versants, présentées de façon détaillée en Annexe IV.5. Rappelons que ces valeurs globales résultent de la combinaison de surfaces issues d'une cartographie des peuplements et de données dendrométriques régionales issues des relevés de terrain de l'IFN. Au Tableau 8.1, nous présentons les résultats pour l'échantillon des 34 bassins versants concernés, et nous illustrons la tendance en Figure 8.7.

Tableau 8.1 : évolution des paramètres dendrométriques et de deux paramètres de surface au cours du temps (valeurs moyenne, minimale et maximale sur l'échantillon des 34 bassins versants concernés)

Cycle	Volume (m ³ ha ⁻¹ de BV)	Accroissement (m ³ an ⁻¹ ha ⁻¹ de BV)	Surface terrière (m ² ha ⁻¹ de BV)	Forêt Dense (% du BV)	Forêt de Conifères (% du BV)
1	46.9 (5.9 - 101.0)	2.0 (0.2 - 3.4)	9.1 (1.5 - 21.2)	47 (9-87)	18 (1-46)
2	55.6 (5.7 - 104.5)	2.5 (0.3 - 5.4)	10.5 (1.2 - 20.9)	49 (10-88)	19 (1-53)
3	60.5 (9.4 - 119.2)	3.0 (0.8 - 8.0)	10.8 (2.3 - 19.2)	52 (10-91)	22 (1-53)

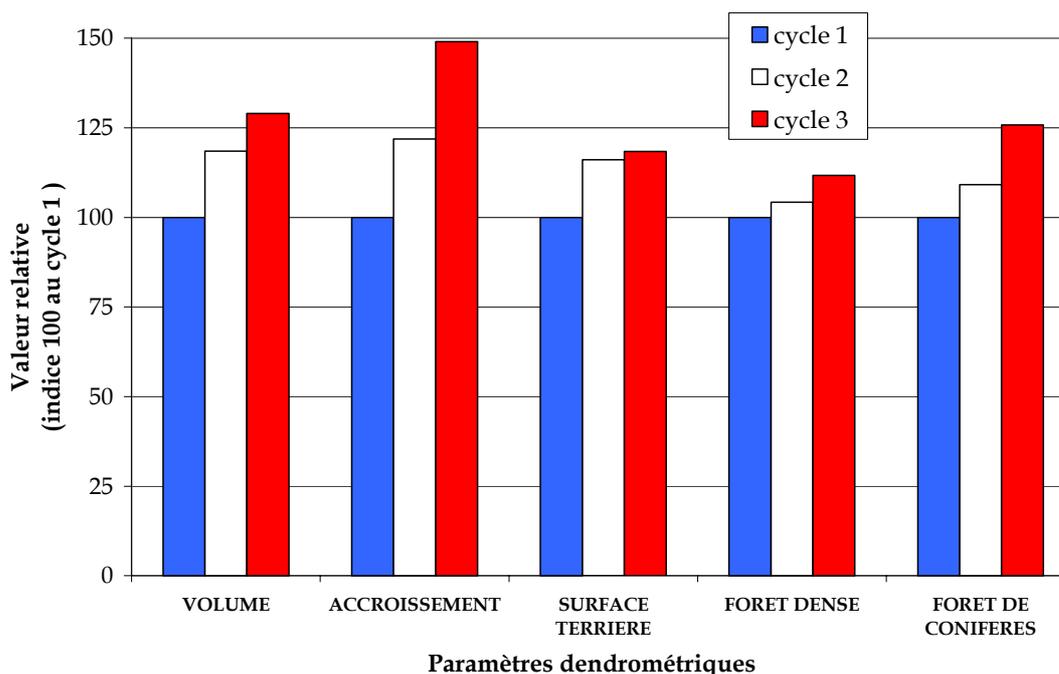


Figure 8.7: évolution des paramètres dendrométriques au cours du temps (valeur moyenne pour les 34 bassins versants étudiés)

Globalement, pour l'échantillon des 34 bassins versants, il apparaît une tendance très claire à l'augmentation pour les trois paramètres dendrométriques considérés.

Dans la mesure où nous savons que ces trois paramètres sont corrélés, mais que nous ne pouvons pas dire *a priori* lequel constituerait la meilleure variable explicative d'une évolution du comportement hydrologique d'un bassin versant, il nous a semblé intéressant de mettre en évidence de manière graphique la corrélation existant entre les paramètres calculés et agglomérés à l'échelle du bassin versant (Figure 8.8, Figure 8.9, Figure 8.10). On peut observer que les paramètres « volume » et « surface terrière » sont les plus fortement corrélés, le couple le moins corrélé étant constitué par la surface terrière et l'accroissement. Ceci s'explique par le mode de calcul du volume des arbres, qui est fortement corrélé au carré du diamètre.

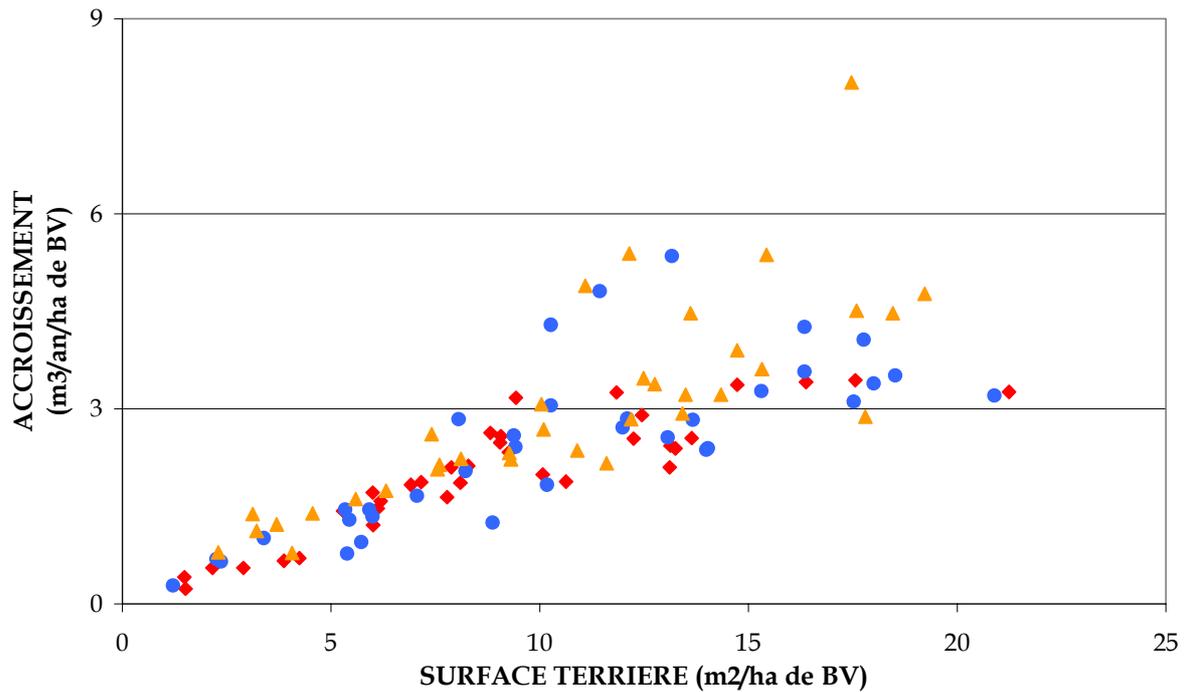


Figure 8.8 : lien entre deux descripteurs dendrométriques à l'échelle du bassin versant (ACC et G) pour les 34 bassins versants de notre échantillon (♦ : cycle 1, ▲ : cycle 2, ● : cycle 3)

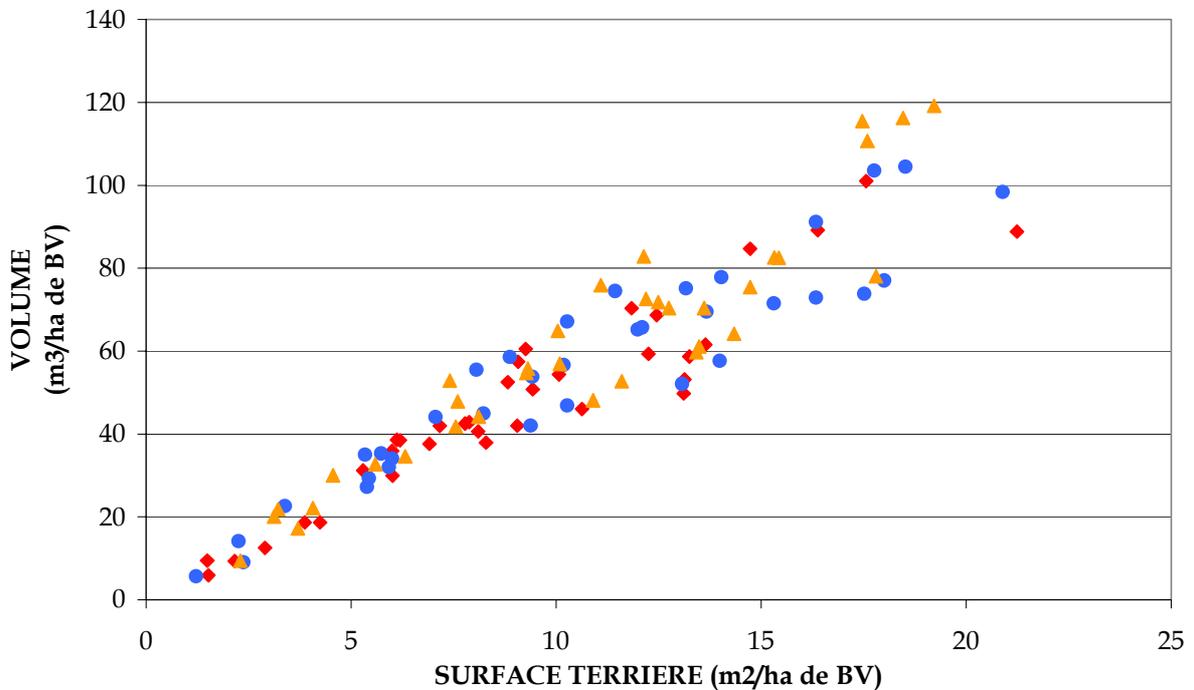


Figure 8.9 : lien entre deux descripteurs dendrométriques à l'échelle du bassin versant (VOL et G) pour les 34 bassins versants de notre échantillon (♦ : cycle 1, ▲ : cycle 2, ● : cycle 3)

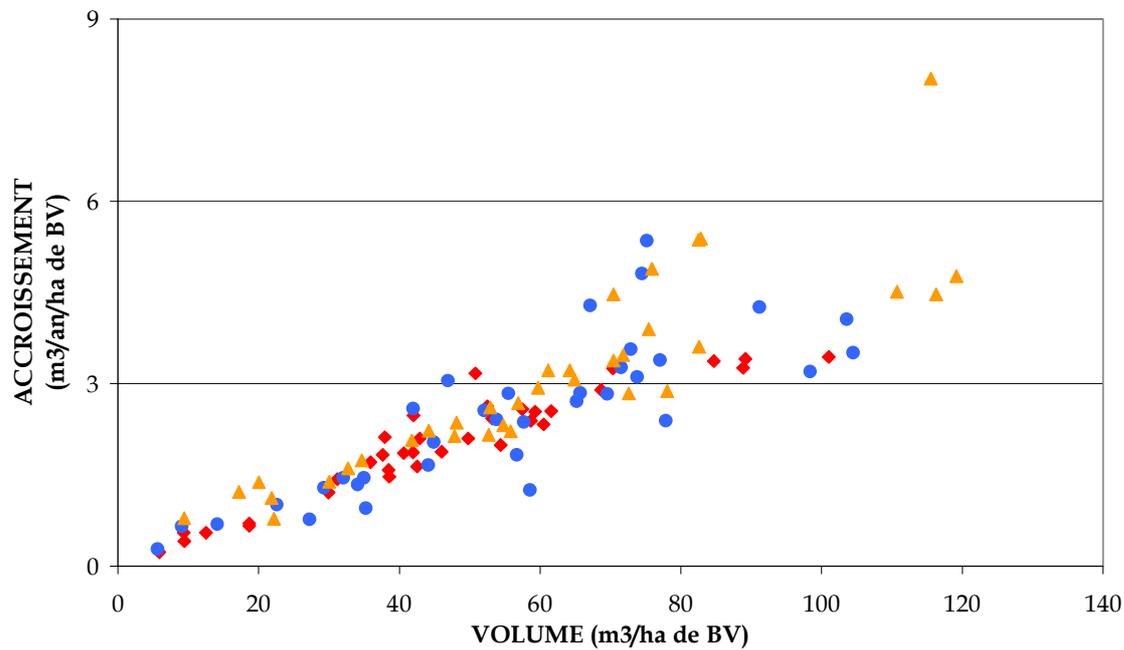


Figure 8.10 : lien entre deux descripteurs dendrométriques à l'échelle du bassin versant (ACC et VOL) pour les 34 bassins versants de notre échantillon (♦ : cycle 1, ▲ : cycle 2, ● : cycle 3)

8.5 Conclusion sur les descripteurs globaux d'évolution du couvert forestier

Nous avons combiné des données dendrométriques et cartographiques pour aboutir à une caractérisation, à chaque cycle d'inventaire, du volume, de l'accroissement et de la surface terrière des peuplements forestiers présents sur 34 de nos bassins versants. Ces données serviront de variables explicatives pour le modèle statistique décrit au chapitre 10.

CONCLUSION DE LA QUATRIEME PARTIE

Au cours de la quatrième partie, nous avons cherché la meilleure solution pour caractériser l'évolution du couvert forestier à l'échelle d'un bassin versant. Nous avons pour cela eu recours aux données de l'Inventaire Forestier National. Etant donné l'ampleur du travail requis pour la cartographie de l'évolution du couvert forestier, il n'a pas été possible de traiter complètement l'échantillon que nous avons envisagé au début du travail. Nous avons traité un peu plus de la moitié de notre échantillon, soit 34 bassins versants. Cet échantillon réduit constitue cependant une base convenable pour essayer de construire un modèle statistique reliant l'évolution du couvert forestier et le comportement hydrologique. Cette question fait l'objet de la sixième partie. En attendant, la cinquième partie est consacrée aux tests permettant de détecter une évolution du comportement hydrologique.

Partie V – Identification de tendances au sein du comportement hydrologique des bassins versants

L'objectif de cette cinquième partie est de proposer des méthodes permettant de mettre en évidence des non-stationnarités du comportement hydrologique des bassins versants.

Au chapitre 9, nous commençons par présenter une revue des méthodes de détection de non-stationnarités, utilisant soit des bassins versants expérimentaux, soit des bassins versants réels. Puis, nous nous fondons sur les tableaux de simulations croisées utilisés au Cemagref pour construire deux tests statistiques non-paramétriques pour les interpréter. Nous proposons ensuite un troisième test permettant de prendre en compte l'incertitude de calage des paramètres.

Au chapitre 10, nous validons ces trois tests sur des bassins documentés dans la littérature et connus pour avoir subi un changement de comportement hydrologique à l'occasion d'une modification d'occupation des sols.

9 DETECTION DE NON-STATIONNARITES DANS LE COMPORTEMENT DES BASSINS VERSANTS

9.1 Fondements des méthodes d'identification des non-stationnarités dans le comportement d'un bassin versant

On peut identifier deux grands types de méthodes permettant de détecter les non-stationnarités dans le comportement d'un bassin versant : les méthodes utilisant un modèle hydrologique fondé sur une représentation explicite des phénomènes physiques mis en jeu et les méthodes fondées sur le principe des bassins versants appariés (bassins réels ou simulés).

9.1.1 Méthodes utilisant un modèle numérique de bassin versant fondé sur une représentation explicite des phénomènes physiques mis en jeu

Lorsque l'on utilise un modèle fondé sur une représentation explicite de la physique, on cherche à rendre compte des modifications intervenues sur le bassin versant en changeant certains paramètres, en modifiant ou ajoutant au sein du modèle certaines fonctions, qui représentent les processus hydrologiques que l'on suppose *a priori* modifiés par l'intervention sur le bassin versant (Kauark-Leite et Nascimento, 1993). On peut ensuite réaliser des simulations en utilisant des séries de variables de forçage connues, pour évaluer les changements sur les variables de sortie. Ces méthodes ne sont mentionnées ici que pour mémoire : nous avons déjà expliqué au chapitre 4 pourquoi nous ne pouvions pas (et ne souhaitons pas) les utiliser.

9.1.2 Méthodes d'analyse utilisant un bassin de référence

La deuxième méthode utilise le principe des bassins versants appariés (réels ou virtuels), que nous avons présenté en détail au Chapitre 2, section 2.3.1. Rappelons que cette approche consiste à sélectionner deux bassins versants, à les suivre simultanément pendant un certain temps pour pouvoir relier leurs comportements, puis à introduire une modification dans l'un (couper la forêt, drainer les terres, construire un lotissement, etc.), l'autre étant conservé intact. La relation établie avant traitement entre le comportement hydrologique des deux bassins est utilisée pour reconstituer ce qu'aurait été la production du bassin traité s'il n'avait pas été traité (en terme de débit annuel, de pointe de crue, d'étiage, etc.).

Cette reconstitution met en œuvre un modèle débit-débit simple (linéaire très souvent). Elle permet une évaluation directe de l'impact du traitement sur le comportement hydrologique du bassin modifié, dans la mesure où l'on peut raisonner directement sur les écarts de comportement hydrologique. Cette méthode constitue la référence pour toutes les études d'impact des opérations de gestion des bassins versants sur l'hydrologie.

9.1.3 Méthodes d'analyse avec simulation d'un bassin de référence

Lorsque l'on cherche à établir si un bassin versant a subi une modification de son comportement hydrologique suite à un changement de couverture végétale, il est

rare que l'on puisse disposer d'un bassin de référence dont la couverture soit restée la même pendant toute la durée d'étude. Le plus souvent, on ne dispose de données de débit et de pluie que pour un seul bassin versant (le bassin versant modifié). Il est alors très difficile de juger d'un changement de comportement, dans la mesure où les périodes « avant changement » et « après changement » diffèrent forcément du point de vue climatique. Pour se ramener au cas de bassins versants appariés, on peut imaginer reconstituer un *bassin de référence virtuel* en utilisant un modèle pluie-débit. En calant le modèle sur les pluies et débits d'une période de calage, on obtiendra un jeu de paramètres « représentatifs » du fonctionnement du bassin sur cette période. Après traitement, on pourra comparer le comportement observé du bassin à celui simulé par le modèle.

Quelle différence y a-t-il entre l'utilisation d'un modèle pluie-débit et l'utilisation de vrais bassins versants appariés ? Les deux approches permettent d'éviter le problème de la variabilité climatique (le principal obstacle à la comparaison d'un bassin avec deux couverts successifs à deux périodes différentes) ainsi que le problème de la variabilité comportementale naturelle des bassins versants (le principal obstacle à la comparaison de deux bassins de couvert différent pendant la même période). Également, chaque approche fait appel à un modèle pour reconstituer les débits du bassin traité (modèle débit-débit d'une part, pluie-débit d'autre part). Mais des différences existent à deux niveaux :

- d'une part, avoir recours à un modèle pluie-débit oblige à expliciter les hypothèses faites sur le fonctionnement hydrologique du bassin. Ce n'était pas le cas lorsque l'on utilisait un bassin de référence (la seule hypothèse était alors que la nature faisait bien les choses...) ;
- d'autre part, les deux approches diffèrent pour ce qui est du degré d'incertitude (Cornish, 1993). Ceci s'explique facilement : il est relativement facile de trouver une bonne corrélation entre deux bassins très semblables, et la mise en œuvre d'une relation débit-débit entre ces deux bassins est alors chose facile. Mais les modèles pluie-débit simulent de façon imparfaite le comportement du bassin. Il faut ajouter que, lorsque l'on étudie deux bassins versants très proches l'un de l'autre, il n'est pas forcément nécessaire de disposer d'une estimation précise de la pluie : on peut se contenter d'un indice relatif (Hewlett, 1971), dans la mesure où les pluies sur les deux bassins seront fortement corrélées. Cela n'est plus le cas lorsque l'on utilise un modèle, qu'il est nécessaire d'alimenter avec des pluies, dont l'estimation reste toujours difficile et entachée d'erreurs.

Cependant, il faut reconnaître que dès lors que l'on s'intéresse à des bassins versants d'assez grande taille, la corrélation entre les pluies s'atténue, et il devient difficile de trouver un bassin de référence réellement inchangé. De plus, disposer de deux stations de jaugeage sur un site d'étude rend les choses encore plus difficiles. **Dans ce cas, l'utilisation d'un modèle pluie-débit devient inévitable.**

9.2 Exemples de méthodes proposées dans la littérature

Dans cette section, nous présentons quelques exemples de détection de tendances utilisant un modèle pluie-débit. Notons que nous nous concentrons ici sur l'approche hydrologique, le problème de la détection statistique étant abordé en section 9.4.

9.2.1 Revue des méthodologies proposées pour l'utilisation d'un modèle pluie-débit pour la détection de changements du comportement des bassins versants

▪ Une discussion générale des possibilités d'utilisation d'un modèle pluie-débit pour détecter l'impact des changements d'occupation du sol sur le comportement des bassins versants est présentée par Lørup et al. (1998)¹. Ils discutent le choix d'un modèle par rapport à la comparaison de bassins versants, et présentent deux arguments en faveur des modèles pluie-débit :

1. les études existantes sur des bassins versants expérimentaux ne leur paraissent pas suffisantes, dans la mesure où ces bassins sont généralement de très petite taille, qu'ils sont généralement inhabités, que leur occupation du sol est uniforme. Dans ce contexte, il n'apparaît pas évident que les résultats des petits bassins versants expérimentaux soient extrapolables à de plus grands bassins, qui présentent une mosaïque d'occupation du sol et où l'influence humaine est forte ;
2. si avec de petits bassins, l'approche des bassins versants appariés permet un bon contrôle de la variabilité climatique, il devient très difficile d'identifier des « bassins de référence » dès lors que l'on s'intéresse à de grands bassins, à la fois en raison de la variabilité du climat, de la géologie, des sols, mais aussi en raison du caractère diffus de l'occupation humaine : il est rare que l'influence anthropique se concentre sur un bassin, en ignorant un autre (c'est notamment le cas en Afrique où les auteurs travaillent).

Les auteurs présentent ensuite une méthodologie standard d'utilisation du modèle :

1. Sélection d'une « période de référence » dont une partie servira à caler le modèle pour déterminer les paramètres représentatifs de la période ;
2. Validation du modèle sur la seconde partie de la « période de référence », avec une approche traditionnelle en statistique : *split-sample test* (Klemeš, 1986) ;
3. Application du modèle calé à la période test, et comparaison des débits simulés et observés pour en déduire l'impact des changements d'occupation des sols.

Un certain nombre d'études réalisées suivant ces principes ont été présentées dans la littérature hydrologique :

▪ Brandt et al. (1988) ont étudié l'impact d'une coupe à blanc sur la réponse hydrologique de petits bassins versants en utilisant un modèle pluie-débit conceptuel global fonctionnant au pas de temps journalier. Ils ont calé le modèle sur une période de trois ans précédant la coupe, puis ont utilisé les précipitations observées pour

¹ Lørup, Refsgaard, et Mazvimavi (1998) font la synthèse d'un rapport présenté précédemment par l'un d'entre eux : Refsgaard, Alley, et Vuglinsky (1989). Methodology for distinguishing between man's influence and climatic effects on the hydrological cycle. IHP-III Project 6.3, UNESCO, Paris.

simuler la réponse du bassin « intact » sur la période qui a suivi la coupe. La différence entre l'observation et la simulation est alors interprétée comme l'effet de la coupe à blanc, qu'il s'agisse du volume total d'écoulement, du volume de crue, de la date de début de fonte des neiges, etc.

- Schreider et al. (2002) appliquent une méthode similaire à la précédente, mais ils essaient de mettre en évidence une tendance progressive, et donc calculent ce qu'ils appellent une « Réponse Hydrologique Potentielle » pour l'ensemble de la série disponible, en utilisant les paramètres optimisés en début de chronique et les pluies observées. Ils étudient l'évolution des résidus pour mettre en évidence une tendance possible.
- Kuczera (1987) a utilisé une technique qui suit les grandes lignes exposées ci-dessus. Mais il va plus loin en proposant une forme explicite pour l'évolution de la relation pluie-débit. L'auteur utilise tout d'abord un modèle pluie-débit linéaire, alimenté par des pluies au pas de temps de la saison et un résultat annuel. Il cherche à modéliser la consommation en eau des repousses forestières après incendie. En Australie, ces dernières peuvent engendrer une décroissance prononcée du rendement en eau des bassins versants (la décroissance, qui peut atteindre 300 à 400 mm, ne s'explique pas par la disparition de la forêt mature, mais par son remplacement par une forêt jeune très dense et à croissance très rapide). Ayant estimé les paramètres du modèle avant l'incendie, il cale ensuite une formule très simple pour représenter l'écart entre observations et simulations du modèle pluie-débit :

$$g(t) = L_{\max} K(t - t_0) e^{[1-K(t-t_0)]} \quad \text{Eq. 9.1}$$

où :

L_{\max} : réduction maximale de rendement en eau (mm) ;

t_0 : date à partir de laquelle la réduction commence à se faire sentir (fixée à deux années après l'incendie) ;

$1/K$: temps (années) écoulé entre le début de la décroissance et son maximum.

L'auteur propose ensuite une interprétation/régionalisation du paramètre L_{\max} de son modèle de décroissance en se fondant sur les caractéristiques du couvert forestier avant incendie.

- Ouédraogo (1996) s'est intéressé aux conséquences hydrologiques de la longue sécheresse en Afrique de l'Ouest durant les années 1960 et 1980, et à une éventuelle modification de la relation pluie-débit. Pour cela, il utilise un modèle pluie-débit mensuel qu'il cale en début de période. Il fonde ensuite son analyse des non-stationnarités sur les différences entre les résidus du modèle en début de période et en fin de période. Ouédraogo étudie ensuite l'évolution des paramètres des modèles, en les calant sur des périodes glissantes.
- Cornish (1993) s'est intéressé à la détection de non-stationnarités dans le cas de petits bassins forestiers (< 1km²). Pour évaluer l'impact de l'exploitation forestière

sur le rendement (annuel) des bassins versants, il compare l'approche « traditionnelle » (évaluation de l'impact fondée sur une régression entre bassin traité et bassin de contrôle) avec une approche fondée sur une modélisation pluie-débit au pas de temps annuel.

L'auteur montre que les deux approches donnent des résultats similaires en ce qui concerne la détection de tendances, bien que les valeurs absolues des écarts soient différentes. Utilisant l'écart type d'estimation sur la période d'apprentissage (avant traitement) pour évaluer la significativité des deux procédures, Cornish montre que l'approche fondée sur la modélisation pluie-débit est la plus incertaine (le rapport des écarts types d'estimation variant entre 1.2 et 2.0).

- Nascimento (1995) s'est intéressé à la détection de non-stationnarités, en utilisant aussi bien les paramètres du modèle GR4J, que des simulations de différents aspects du régime hydrologique (crues, étiages, etc.). Il a utilisé des données réelles et des données synthétiques. Son approche est originale par rapport aux autres études qui considèrent uniquement les deux extrémités des chroniques disponibles : sa méthode consiste en effet à diviser la période d'étude en plusieurs morceaux, et à réaliser des calages et des contrôles successifs. Le jugement sur l'existence ou non d'une non-stationnarité peut alors se fonder soit sur l'analyse de l'évolution des paramètres du modèle, soit sur l'évolution de résultats de simulation du modèle.

Sur le BVRE du Réal Collobrier, où il a eu la possibilité d'appliquer la même méthode sur un bassin incendié et un bassin témoin resté intact, il a pu mettre en évidence le fait que même le bassin témoin change son comportement, ce qui mène à penser que la non-stationnarité observée n'est sans-doute pas due qu'à l'incendie, mais aussi à la très longue sécheresse observée sur le bassin avant et après cet incendie¹.

Nascimento (1995) utilise des données synthétiques pour tester la capacité du modèle à identifier par calage des tendances, dans différents cas défavorables : erreurs aléatoires sur les débits, erreurs aléatoires sur les pluies et les débits. Si l'auteur reste convaincu de la capacité de GR4J à identifier des tendances, il n'en reste pas moins que des bruits aléatoires ajoutés aux pluies et aux débits, quand ils viennent se superposer aux non-stationnarités synthétiques, peuvent sérieusement perturber leur détection. Il conclut que « *l'identification de changements sur la relation pluie-débit à l'échelle du bassin versant au travers d'un modèle empirique tel que GR4J n'est possible que quand ce changement est très significatif.* »

Enfin, Nascimento a aussi abordé la question de la détection de tendances sur les paramètres des modèles. Et même si, en raison de la parcimonie du modèle GR4J, les paramètres de ce dernier sont relativement indépendants les uns des autres, il n'apparaît pas moins que des compensations existent et que la détection de tendances sur les paramètres reste une question délicate.

¹ Un bassin témoin présente donc de l'intérêt, même lorsque l'on utilise un modèle.

9.2.2 Présentation de la méthode des simulations croisées, adoptée pour notre recherche

L'approche que nous avons choisie fournit un support d'interprétation original pour les séries de calages et de contrôles proposées par Nascimento (1995). Elle est adaptée à la détection des changements progressifs comme à celle des changements brusques.

Supposons que nous disposions de 40 années de données pluie-débit pour un bassin versant. On peut définir, à l'aide du modèle, un comportement moyen du bassin pour chaque sous-période de 10 ans¹. Il suffit pour cela de caler le modèle en utilisant les chroniques observées de pluie et de débit, et l'on obtient 4 jeux de paramètres représentatifs du comportement du bassin au cours de chacune des périodes. La combinaison de paramètres constitue bien un « modèle » du comportement du bassin pendant la période qui a servi au calage. Appelons M_1 , M_2 , M_3 et M_4 ces 4 modèles, et P_1 , P_2 , P_3 et P_4 les périodes correspondantes, et faisons une analogie avec le schéma des bassins versants appariés : M_1 , M_2 , M_3 et M_4 sont des bassins de référence, restés dans l'état du bassin aux périodes P_1 , P_2 , P_3 et P_4 respectivement.

Comme lorsque l'on utilise des bassins réels, il nous faut à présent définir une variable hydrologique d'étude (le module annuel, la lame d'eau écoulée en crue, etc.) et comparer les valeurs réelles et simulées. Les résultats peuvent être présentés sous la forme suivante (Tableau 9.1) :

Tableau 9.1 : Tableaux des simulations croisées pour l'étude de l'évolution du comportement hydrologique d'un bassin versant

"Modèles" "Périodes"	M1	M2	M3	M4
P1	≡ valeur réelle	valeur prédite par M2 en utilisant les pluies de la période P1	valeur prédite par M3 en utilisant les pluies de la période P1	valeur prédite par M4 en utilisant les pluies de la période P1
P2	valeur prédite par M1 en utilisant les pluies de la période P2	≡ valeur réelle	valeur prédite par M3 en utilisant les pluies de la période P2	valeur prédite par M4 en utilisant les pluies de la période P2
P3	valeur prédite par M1 en utilisant les pluies de la période P3	valeur prédite par M2 en utilisant les pluies de la période P3	≡ valeur réelle	valeur prédite par M4 en utilisant les pluies de la période P3
P4	valeur prédite par M1 en utilisant les pluies de la période P4	valeur prédite par M2 en utilisant les pluies de la période P4	valeur prédite par M3 en utilisant les pluies de la période P4	≡ valeur réelle

Dans la case (i,j) de ce tableau, on trouvera la valeur prédite par le « bassin de référence » (ou modèle) M_j , en utilisant les pluies de la période P_i .

¹ Ce n'est qu'un exemple. GR4J, comme la plupart des modèles de sa catégorie, peut être calé sur deux ou trois ans de données.

Partie V : Identification de tendances au sein du comportement hydrologique

Sur la diagonale, on trouvera la valeur prédite par le modèle pour la période sur laquelle il a été estimé, qui sera donc proche de la valeur réellement observée sur cette période.

Pour une interprétation plus facile de ce tableau, on peut normer chaque période (chaque ligne) par la valeur située sur la diagonale (qui représente à peu de choses près la valeur réellement observée). Si on exprime le résultat en pourcentage, on aura donc des 100 sur la diagonale. Si l'on suspecte une modification progressive du bassin versant, on peut s'attendre à trouver trois types de matrices (Tableau 9.2).

Tableau 9.2 : trois différents types de tableaux de simulations croisées théoriques

	100	103	99	102
	97	100	101	96
	101	99	100	100
	98	104	100	100

Matrice 1

	100	105	110	120
	94	100	103	117
	89	96	100	109
	80	84	91	100

Matrice 2

	100	94	89	80
	105	100	96	84
	110	103	100	91
	120	117	109	100

Matrice 3

Ces matrices « type » peuvent être interprétées de la façon suivante :

- Matrice 1 : pas de tendance apparente ;
- Matrice 2 : le bassin a tendance à « produire » de plus en plus ;
- Matrice 3 : le bassin a tendance à « produire » de moins en moins.

Bien entendu, les cas réels pourront être moins tranchés que les trois exemples ci-dessus, et pourront concerner d'autres variables hydrologiques cibles. Nous abordons ce sujet dans la section suivante.

9.3 Choix de variables hydrologiques représentatives du comportement du bassin versant

Pour notre étude, nous avons retenu quatre variables hydrologiques pour caractériser de façon aussi complète que possible le comportement hydrologique d'un bassin versant. Ces quatre variables permettent une interprétation concrète des tendances observées, de façon bien plus simple que si l'on avait retenu les quatre paramètres de GR4J, par exemple¹. Ces variables sont les suivantes (voir Figure 9.1) :

¹ D'autant plus que l'étude de Nascimento (1995) a montré clairement qu'il était difficile d'interpréter les changements sur les paramètres.

1. l'écoulement total ;
2. l'écoulement en crue (défini comme le volume écoulé au-dessus d'un seuil égal à quatre fois le module de l'écoulement) ;
3. l'écoulement en étiage (défini comme le déficit d'écoulement au-dessous d'un seuil égal à un quart du module de l'écoulement) ;
4. l'écoulement de base (l'indice considéré correspond au rapport entre l'écoulement de base calculé par la méthode de L'vovitch (1979) et l'écoulement total).

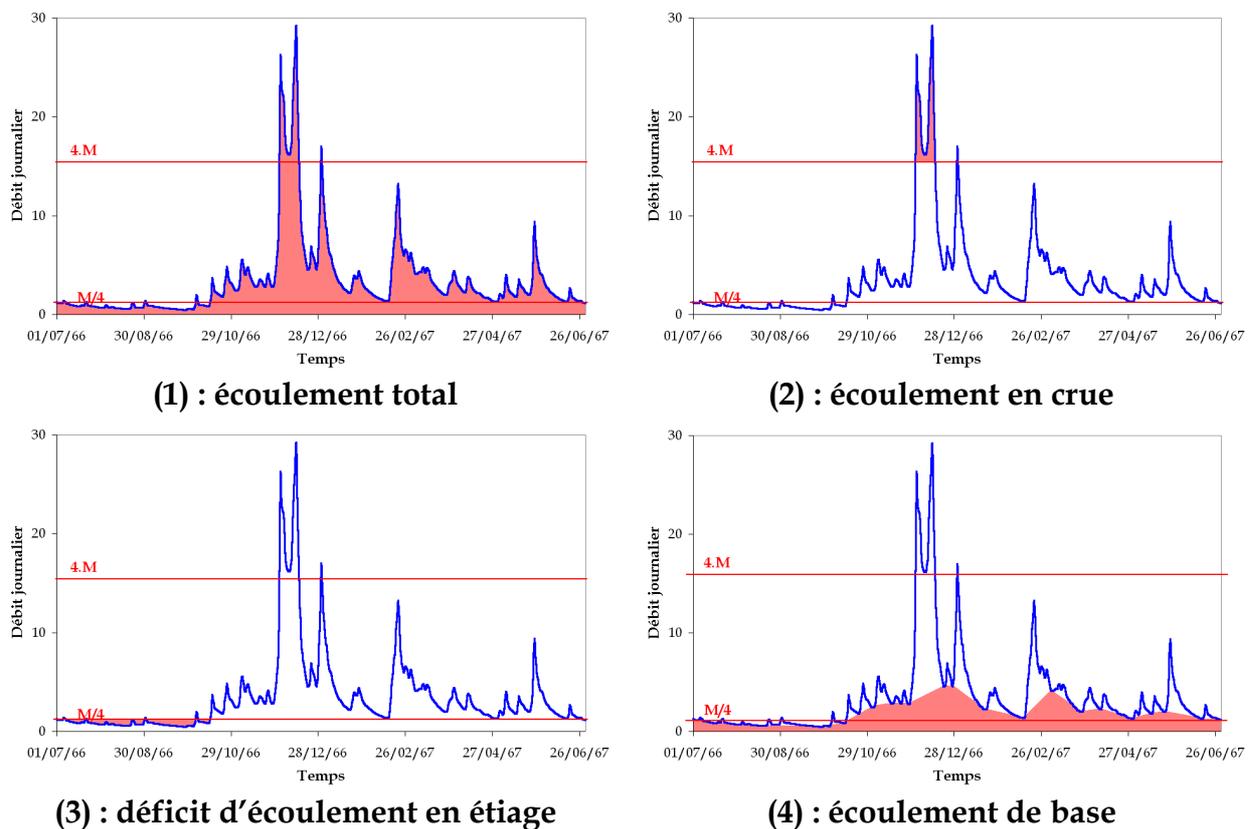


Figure 9.1 : hydrogramme présentant les lames d'eau correspondant à chacune des variables hydrologiques retenues. Les deux lignes rouges représentent respectivement les seuils retenus pour définir les crues (quatre fois le module) et les étiages (un quart du module).

Afin de pouvoir étudier la stationnarité de ces quatre variables hydrologiques sur les bassins versants de notre échantillon, nous proposons dans la section suivante deux tests statistiques non-paramétriques, qui nous permettront d'exploiter les *tableaux de simulations croisées* que nous construisons pour caractériser l'évolution de chacune de ces variables.

9.4 Mise au point d'hypothèses permettant l'évaluation des tableaux de simulations croisées

Nous avons donc opté pour l'utilisation de *tableaux de simulations croisées* qui présentent de façon compacte le résultat des calages et des simulations effectués sur des périodes successives : chaque colonne du tableau correspond à un modèle (un jeu

de paramètres représentant le bassin à un moment donné), et chaque ligne du tableau correspond à une période (c'est à dire, une série chronologique de pluie à laquelle on fait réagir le modèle hydrologique en simulation).

Nous cherchons à présent à construire un test permettant de mettre en question l'hypothèse suivante :

H_0 : « pour une même pluie fixée en entrée, les différents modèles testés en simulation donnent la même sortie hydrologique à un bruit aléatoire près. »

Dans les sections suivantes, nous proposons deux statistiques de test, permettant le calcul du risque de première espèce¹ associé à H_0 .

9.4.1 Test utilisant le signe des évolutions

Pour interpréter simplement les tableaux de simulations croisées, nous proposons de remplacer chaque valeur par un signe, traduisant une évolution croissante ou décroissante de la variable hydrologique considérée avec le temps. Si l'hypothèse H_0 est vraie, le signe '+' et le signe '-' sont équiprobables dans chaque cas. Un dénombrement des signes de nos tableaux de simulations croisées permet d'évaluer les chances pour que leur obtention soit l'effet du hasard.

Nous prendrons tout d'abord l'exemple de deux matrices d'évolution 4x4, pour illustrer le mode de test du signe que nous souhaitons mettre en place, puis nous généraliserons à une matrice nxn.

▪ Exemple

On se donne les deux matrices de simulations croisées suivantes :

2113	1613	1749	1740
1697	1244	1355	1360
1765	1328	1442	1438
1577	1145	1249	1254

Matrice 1

1606	1185	909	826
1588	1168	881	812
1906	1428	1110	1018
1512	1109	840	766

Matrice 2

On va chercher à évaluer si l'arrangement des valeurs simulées peut être considéré comme l'effet du hasard ou non. Pour cela, on va remplacer chaque valeur par un '+' ou un '-', suivant que les valeurs sont supérieures ou inférieures à la valeur de la diagonale. En effet, la valeur située sur la diagonale représente pour chaque ligne la meilleure référence, dans la mesure où il s'agit de la valeur la plus proche de la valeur réellement observée (car prédite par le modèle calé sur la période en

¹ Dans tout ce chapitre, le risque de première espèce a été calculé pour un test de type « bilatéral », et l'on a placé la barre correspondant aux valeurs « extrêmes » à 5% et 95%, aux deux extrémités de la distribution cumulée.

question). Notons que la comparaison s'effectue ligne par ligne, car il est nécessaire de se placer dans des conditions d'égale pluviométrie.

Ainsi :

2113	1613	1749	1740	devient	0	-	-	-
				et				
1697	1244	1355	1360	devient		0	+	+

Les Matrices 1 et 2 peuvent être alors recodées¹ en '+' et en '-':

0	-	-	-
	0	+	+
		0	-
			0

Matrice 1

0	-	-	-
	0	-	-
		0	-
			0

Matrice 2

A présent, tester l'hypothèse H_0 revient à tester si la répartition des '+' et des '-' dans les matrices ci-dessus peut ou non être l'effet du hasard. Il peut s'agir d'un problème de dénombrement : la Matrice 1 compte 4 '-' et 2 '+', la Matrice 2 compte 6 '-' et aucun '+'. Clairement, la probabilité que le hasard soit le seul responsable de l'obtention d'un tableau où tous les signes sont identiques, est faible (cette probabilité est inférieure à 1%). On peut donc rejeter H_0 en ne prenant qu'un faible risque de se tromper.

En revanche, le nombre de '+' dans la Matrice 1 ne constitue absolument pas un événement extrême, si l'hypothèse H_0 est vraie. On prendrait donc un très grand risque à rejeter H_0 .

▪ Cas général d'une matrice nxn

Pour une matrice nxn, on cherche à quantifier le risque pris lorsque l'on rejette H_0 . Soit $i = \text{Min}(\text{nombre de '+'}, \text{nombre de '-'})$. On peut démontrer (voir Annexe V.3) que la distribution des signes sous l'hypothèse H_0 ne dépend pas de la loi de distribution des valeurs de la matrice de départ. On peut par conséquent calculer par simulation numérique la distribution de i pour différentes valeurs de n . En simulant 300 000 tableaux de distribution normale, on a calculé l'abaque présenté Figure 9.2.

¹ On observe lors du recodage une forte tendance à obtenir des matrices symétriques. Cette observation s'explique facilement pour un bassin en évolution : si le modèle M3 a tendance à produire plus d'écoulement que le modèle M1, alors on aura un signe '+' dans la case (1,3) et un signe '-' dans la case (3,1). Cette symétrie pouvant fausser le calcul de la *p-value* α' , on a préféré dans ce qui suit ne travailler que sur des demi-matrices.

▪ Exemple d'utilisation de la Figure 9.2

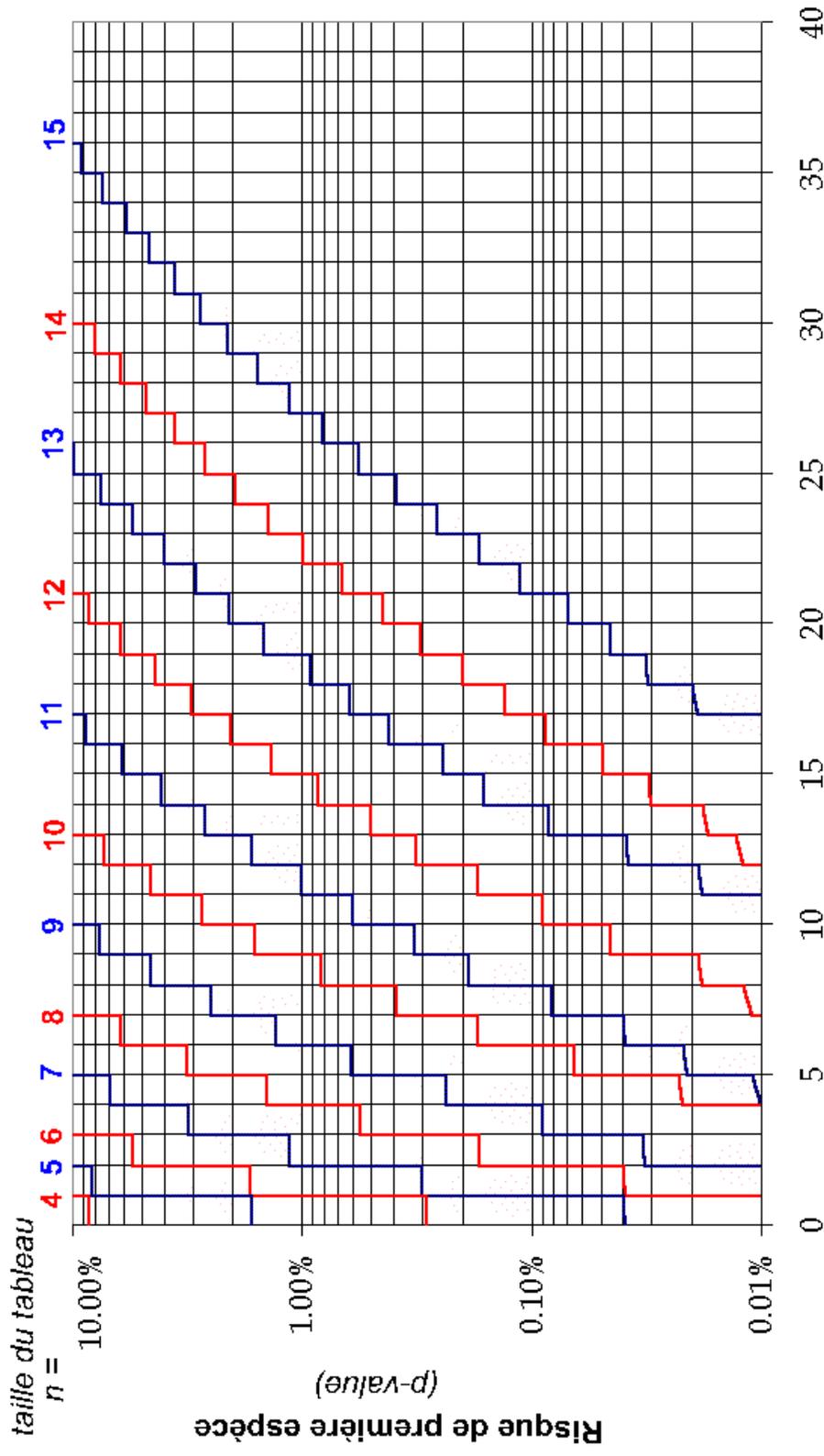
Dans le cas d'une matrice 6x6 ($n=6$ sur la figure), l'abaque nous donne les risques de première espèce suivants, en fonction du nombre i d'éléments dans le groupe ('+' ou '-') le moins représenté : le risque α' est de 10% si $i=3$, et il tombe à 5% si $i=2$, à 1% si $i=1$, etc.

▪ Interprétation du signe majoritaire

Si H_0 est rejetée, le signe majoritaire donne une indication sur les possibilités d'évolution de la variable au cours du temps : si les '+' sont majoritaires, cela signifie que la variable hydrologique simulée dans le tableau à tendance à croître avec le temps, si les '-' sont majoritaires, c'est l'inverse. Ainsi, si la variable hydrologique simulée dans le tableau est le volume écoulé en crue, on pourra conclure à une non-stationnarité du comportement du bassin et suggérer une tendance du bassin à produire des crues de plus en plus fortes.

▪ Remarque

Le test du signe doit être restreint à la moitié d'un tableau de simulations croisées, car le tableau devient quasi-symétrique en cas de non-stationnarité.



Valeur de la statistique du signe sur les tableaux de simulations croisées

Figure 9.2 : abaque permettant le calcul de la « *p-value* » α (exprimée en %) : risque pris en rejetant H_0 , en fonction du nombre d'éléments dans le groupe ('+' ou '-') le moins représenté (chaque courbe correspond à une valeur de n , n^2 correspondant à la dimension de la matrice testée)

9.4.2 Test conditionnel fondé sur les permutations des tableaux de simulations croisées

Nous proposons ici une deuxième statistique (que nous appellerons α' dans ce qui suit), dont l'objectif est de mieux prendre en compte l'amplitude des changements observés (et non plus seulement leur sens comme nous l'avons fait jusqu'ici). Il est clair qu'on exploiterait ainsi une information supplémentaire, nous permettant de mieux trancher. Ainsi, si les deux lignes suivantes donnent toutes deux le même résultat en terme de signe, on conçoit intuitivement que, sous l'hypothèse H_0 , la seconde est beaucoup plus improbable que la première :

766	767	769	772
-----	-----	-----	-----

deviennent

0	+	+	+
---	---	---	---

766	805	1109	1512
-----	-----	------	------

Pour prendre en compte l'amplitude des variations, tout en restant dans le cadre d'un test non-paramétrique, nous ne pouvions recourir à une statistique du type « signe et rang », s'inspirant du test de Wilcoxon (CERESTA, 1986), dans la mesure où il nous aurait fallu cette fois-ci faire des hypothèses sur la loi de distribution des valeurs d'entrées. Nous avons donc choisi d'opérer un test de permutation, conditionnel aux données, que nous calculerons sur des demi-matrices, comme pour le calcul de α' .

Le principe de ce test est très simple : sous l'hypothèse H_0 , les valeurs de chaque ligne devraient pouvoir être permutées librement, les lignes résultantes étant toutes équiprobables. Ainsi, les lignes suivantes (issues de la Matrice 1 de l'exemple précédent) sont équiprobables sous H_0 :

2113	1613	1749	1740
------	------	------	------

,

1613	2113	1749	1740
------	------	------	------

,

1613	1740	1749	2113
------	------	------	------

	1244	1355	1360
--	------	------	------

,

	1244	1360	1355
--	------	------	------

,

	1355	1360	1244
--	------	------	------

A partir d'une matrice 4x4 réellement observée, on peut donc générer $4! \times 3! \times 2!$ matrices équiprobables¹. Si l'on se donne une statistique « parlante » calculée sur chacune des matrices, on pourra alors estimer le caractère plus ou moins rare de la matrice observée.

On propose de prendre ici pour statistique la somme des différences avec la valeur de la diagonale (que l'on appellera SDD dans ce qui suit). Pour les matrices de l'exemple précédent, cela donne :

¹ Plus généralement, pour une matrice $n \times n$, il y aura $n! \times (n-1)! \times (n-2)! \times \dots \times 3! \times 2! \times 1!$ matrices équiprobables sous l'hypothèse H_0 .

2113	1613	1749	1740	→	-500 -364 -373 =	-1237
	1244	1355	1360	→	111 +116 =	227
		1442	1438	→	-4 =	-4
			1254	→	0	0
Matrice 1					Total :	-1014

1606	1185	909	826	→	-421 -697 -780 =	-1898
	1168	881	812	→	-287 -356 =	-643
		1110	1018	→	-92 =	-92
			766	→	0	0
Matrice 2					Total :	-2633

Intuitivement, on sent que si l'on permute les valeurs au sein de chaque ligne de la Matrice 2, on ne pourra pas atteindre un total inférieur à -2633. Sous l'hypothèse H_0 , la Matrice 2 est donc très rare. Pour s'en convaincre, on a présenté en Figure 9.3 la distribution cumulée de la statistique SDD. On note que près de 96% des matrices possibles ont une statistique SDD supérieure à celle de la Matrice 2. Le risque de première espèce pris en rejetant H_0 est donc faible.

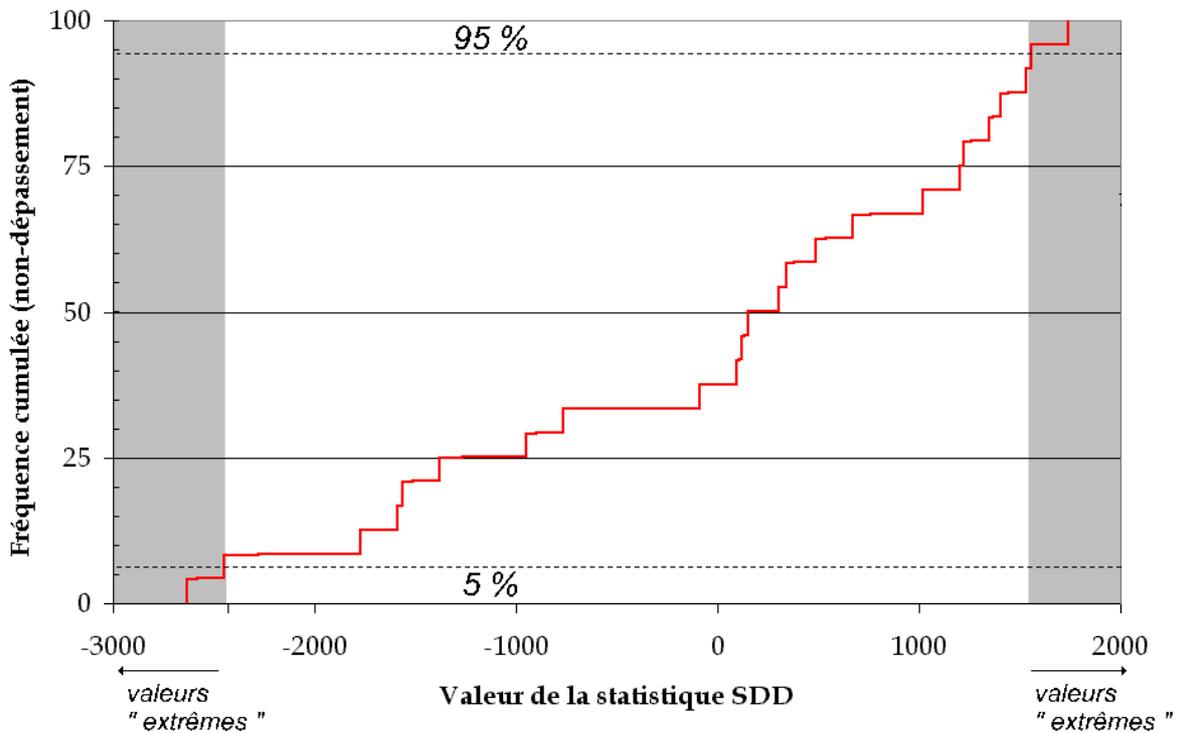


Figure 9.3 : distribution empirique des 288 valeurs de la statistique SDD (Somme des Différences par rapport à la Diagonale) obtenues pour la Matrice 2 de notre exemple (les lignes pointillées désignent le domaine des valeurs « extrêmes », à 5 et 95%)

9.5 Mise au point d'un troisième test permettant de prendre en compte l'incertitude sur les paramètres lors du calage des modèles

9.5.1 Pourquoi un test supplémentaire ?

Les deux tests présentés dans la section précédente permettent une valorisation statistique simple et facile à mettre en œuvre des tableaux de simulations croisées. Nous croyons à la robustesse et à l'utilité de ces tests très simples, mais ici, nous avons souhaité réfléchir à un test plus « élaboré », qui pourrait permettre de prendre en compte l'incertitude lors de l'optimisation des paramètres du modèle pluie-débit utilisé. En effet, la connaissance que nous avons du comportement du bassin à une période donnée est entachée d'incertitudes qui peuvent être liées :

- au fait que le modèle représente nécessairement une vision simpliste du bassin ;
- aux pas de temps et d'espace utilisés ;
- aux erreurs sur les pluies et les débits ;
- aux incertitudes numériques liées à l'optimisation des paramètres ;
- etc...

Nous avons donc conçu un troisième test, où l'on ne compare plus les modèles successifs de bassin sur la base de leurs résultats sur un petit nombre de périodes pluvieuses, mais où l'on caractérise chaque modèle par une distribution de valeurs de l'une des quatre variables hydrologiques étudiées. Cette distribution est obtenue de la façon suivante : nous tirons au hasard cent quadruplets (X_1, X_2, X_3, X_4) équiprobables des paramètres du modèle pluie-débit GR4J, en utilisant la matrice de variance-covariance des paramètres (estimée au cours du calage). Nous utilisons ensuite toute la série de pluies disponible pour obtenir une valeur de l'une des quatre variables hydrologiques. *Chaque modèle est donc défini par une distribution de 100 valeurs d'une variable hydrologique, grâce à laquelle on tient compte d'une partie de l'incertitude de modélisation.*

9.5.2 Etude des places respectives des distributions de probabilité

Dans ce qui suit, on décrit la méthode dans le cas particulier de quatre périodes successives, sur lesquelles on a identifié un modèle représentatif du comportement du bassin. Les fonctions *densité de probabilité* caractérisant chacune des variables hydrologiques (sous l'hypothèse que le modèle M_i est vrai) se présentent sous la forme suivante (Figure 9.4) :

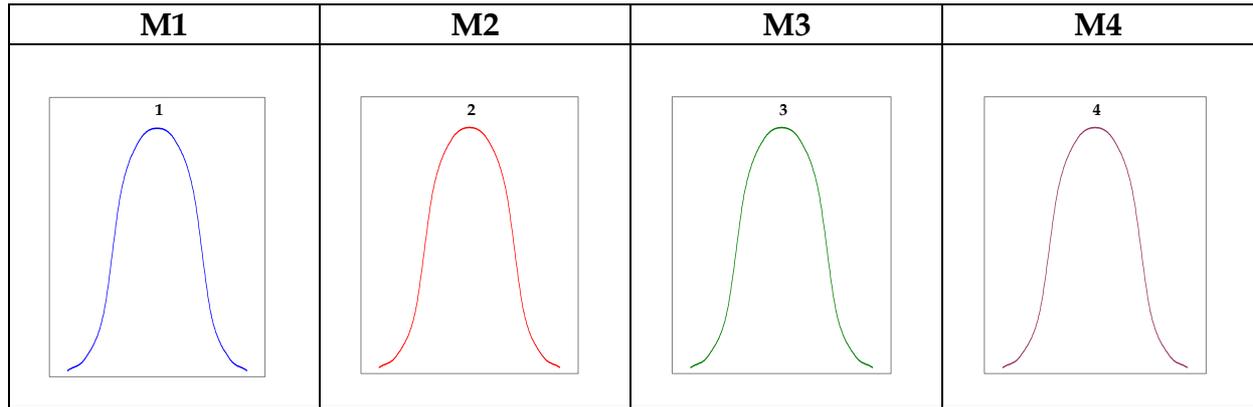


Figure 9.4 : représentation des fonctions densité de probabilité caractérisant chacune des variables hydrologiques

Si l'on reporte toutes les distributions sur le même graphe, on peut imaginer deux situations contrastées présentées en Figure 9.5 (chaque modèle pouvant être décrit de façon équivalente par sa fonction densité de probabilité ou par sa fonction de répartition).

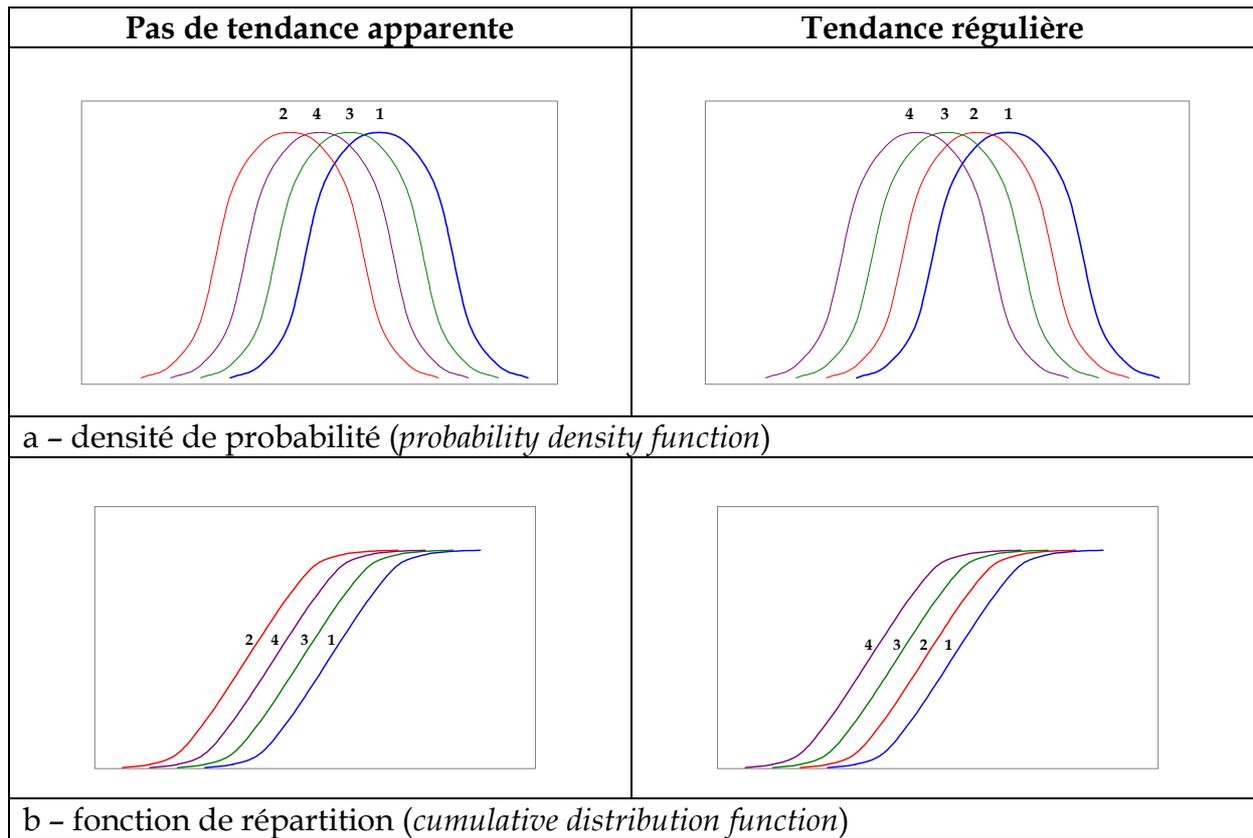


Figure 9.5 : analyse de deux situations types utilisant les densités de probabilité ou les fonctions de répartition d'une variable hydrologique

Les deux situations-types présentées en Figure 9.5 ont en commun le fait que les distributions des 4 modèles se recouvrent partiellement (cela correspond à la grande majorité des cas, l'incertitude relative au modèle restant importante par rapport aux différences qui existent entre les modèles). Lorsque l'ordre chronologique

Partie V : Identification de tendances au sein du comportement hydrologique

n'intervient pas dans la place respective des distributions, il n'y a aucune raison de croire à une tendance. En revanche, lorsque les distributions sont en ordre chronologique, on peut suspecter que le bassin est en évolution.

On a donc construit un test statistique non-paramétrique et conditionnel aux données pour calculer le risque de première espèce associé à l'hypothèse suivante :

H₀ : « l'ordre des distributions caractérisant les différents modèles est indépendant de l'ordre chronologique »

Pour construire ce test, il fallait en premier lieu définir une statistique traduisant la place respective de chaque modèle, et ensuite définir une méthodologie permettant de simuler des répartitions équiprobables sous l'hypothèse H₀.

9.5.3 Une statistique traduisant la place respective de modèles

Les distributions décrivant chacun des modèles peuvent être comparées deux à deux, et le résultat de cette comparaison présenté sous forme d'un tableau comme suit (Tableau 9.3).

Pour le calcul, chaque case du tableau ci-dessous est remplie en piochant au hasard 100 couples de valeurs dans chaque distribution, et en comptant le nombre de fois où la valeur issue de M_i est supérieure à celle issue de M_j.

Tableau 9.3 : tableau récapitulatif des places respectives des distributions

supérieur à → ↑	M1	M2	M3	M4
M1		p(M1>M2)	p(M1>M3)	p(M1>M4)
M2			p(M2>M3)	p(M2>M4)
M3				p(M3>M4)
M4				

Sous l'hypothèse H₀, p(M_i>M_j)=0.5, quelque soit i différent de j. On peut donc proposer la statistique suivante pour caractériser de façon synthétique l'agencement des distributions :

$$S = \sum_{\substack{i=1,n-1 \\ j=i+1,n}} (x_{i,j} - 0.5) \quad \text{Eq. 9.2}$$

où $x_{i,j} = p(M_i > M_j)$

Dans le premier des cas présenté en Figure 9.5 (pas de tendance apparente), la valeur absolue de la statistique S sera « faible » (positive ou négative), mais pour le second cas (tendance apparente), la valeur absolue de S sera « forte ». Voyons à présent comment définir par simulation le « fort » et le « faible ».

9.5.4 Simulation des situations équiprobables sous H_0

La plus simple des solutions pour simuler des situations équiprobables sous H_0 consiste à intervertir l'ordre chronologique des modèles (des distributions qui les caractérisent). Si n est le nombre de modèles, il existe $n!$ combinaisons possibles (en incluant la situation observée). Ceci signifie que l'on ne pourra identifier de situation « exceptionnelle » qu'à partir d'une taille de matrice suffisante. Nous avons choisi d'utiliser ce test à partir de $n=5$ ($5!=120$), et pour des raisons de temps de calcul, nous nous sommes limités à $n=8$ ($8!=40320$)¹.

La simulation nous permet de tracer pour la statistique S une distribution (conditionnelle à H_0) comme en Figure 9.3, et de replacer la valeur observée afin de juger de son caractère plus ou moins exceptionnel.

9.6 Conclusion du chapitre 9

A l'issue de la revue des méthodes proposées dans la littérature, nous avons proposé trois tests statistiques non-paramétriques pour détecter d'éventuelles tendances dans le comportement hydrologique des bassins versants. Le recours à la simulation pluie-débit permet d'appliquer chaque test à différentes composantes du régime hydrologique : l'écoulement total, l'écoulement en crue, l'écoulement en étiage et l'écoulement de base.

Les deux premiers tests permettent de tester si les tableaux de simulations croisées (que nous utilisons pour diagnostiquer l'évolution du comportement hydrologique des bassins versants) peuvent être considérés comme l'expression d'un comportement stationnaire.

- Un test est basé sur le signe (le signe des différences entre valeurs simulées et valeur de référence), permettant le calcul du risque de première espèce α' . Les matrices sont interprétées au moyen d'une abaque donné en Figure 9.2.
- Le second est basé sur le signe et l'amplitude des différences (risque α''). Il est conditionnel aux données, et nous a semblé plus riche et plus efficace que les précédents pour identifier les non-stationnarités.
- Le troisième test (risque α'''), est fondé sur l'analyse des distributions de chacune des variables hydrologiques étudiées (chaque distribution permettant la prise en compte d'une partie de l'incertitude de modélisation au travers de

¹ Cette limite supérieure n'est pas réellement gênante, dans la mesure où on peut toujours réduire le nombre de modèles considérés en calant ceux-ci sur des périodes plus longues. En revanche, il ne serait pas prudent, lorsque la période de suivi est un peu courte, d'augmenter le nombre de périodes en réduisant la durée des calages, car on réduit ainsi la quantité d'information disponible pour l'identification des paramètres du modèle.

Partie V : Identification de tendances au sein du comportement hydrologique

l'incertitude sur les paramètres du modèles pluie-débit). Le test est construit sur une comparaison de l'ordre de ces distributions avec l'ordre chronologique.

Dans le chapitre suivant, nous proposons une validation de ces tests sur un ensemble de cas d'école.

10 DES CAS D'ECOLE CELEBRES POUR VALIDER LES TESTS DE DETECTION DES TENDANCES

Nous avons sélectionné 4 « cas d'école » que nous présentons dans cette partie afin de démontrer les possibilités des tests présentés au chapitre précédent et de nous aider à interpréter leurs résultats lorsqu'ils seront appliqués à l'échantillon de bassins versants du Massif central. Nous avons choisi :

- **un cas d'évolution progressive** (bassin de Coshocton) ;
- **deux cas de perturbations brusques** (bassins de Three Bar et du Réal Collobrier) ;
- **un cas de stabilité présumée** (Andrews Experimental Forest).

Les résultats complets (matrices brutes) sont présentés en Annexe V.1, et l'Annexe V.2 récapitule les caractéristiques de chaque bassin test, sous formes de fiches. Dans tout ce qui suit, nous nous sommes fixé arbitrairement comme limite de ce qui est « rare » comme événement, 5% dans le cadre d'un test bilatéral.

10.1 On retrouve la trace d'un changement progressif sur le Bassin Versant Expérimental de Coshocton

10.1.1 Un bassin expérimental suivi depuis plus de 60 ans

Le *North Appalachian Experimental Watershed* (NAEW) est situé à Coshocton dans l'Ohio (Etats-Unis). Il est géré par l'*Agricultural Research Service* depuis 1935. L'un des sous-bassins versants du NAEW, le bassin 172 (18 ha) présente un grand intérêt pour notre recherche : c'est certainement le seul bassin au monde où une expérience de **reboisement de terres agricoles** a été suivie sur une très longue durée¹. Avant 1938, le bassin 172 était agricole à 70%, forestier à 30%. En 1938 et 1939, la partie agricole du bassin a été reboisée avec des pins et des robiniers (McGuinness et Harrold, 1971). La plantation forestière a été éclaircie au cours des hivers 1967, 1968 et 1969 ; en 1970, une petite surface de feuillus a été exploitée (Langford et McGuinness, 1976). Les mesures n'ont été interrompues que trois années (de mi-1972 à mi-1975), on dispose donc d'une série de pluie et de débit de 1939 à 1999, sur près de 60 ans.

10.1.2 Le reboisement est suivi d'un changement progressif du comportement hydrologique

Si l'on applique les tests sur la période de croissance de la plantation (1938-1967), on obtient les matrices suivantes (Tableau 10.1).

¹ S'il existe de nombreux bassins versants expérimentaux forestiers, les études qui y ont été menées analysaient presque toujours l'influence du déboisement, afin d'obtenir des résultats dans des délais raisonnables.

Partie V - Identification de tendances au sein du comportement hydrologique

Tableau 10.1 : les matrices de simulation croisées pour le bassin 172 de Coshocton sur la période 1938-1967 (couvert forestier en croissance) indiquent une probable non-stationnarité

<table border="0"> <tr><td>1938-</td><td>43-</td><td>48-</td><td>53-</td><td>58-</td><td>63-</td></tr> <tr><td>-43</td><td>-48</td><td>-53</td><td>-58</td><td>-63</td><td>-67</td></tr> <tr><td>○</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td></td><td>○</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>○</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td>○</td><td>+</td><td>+</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td>○</td><td>+</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>○</td></tr> </table> <p>$\alpha' : 5.0\%, \alpha'' : 1.0\%$ (1) : écoulement total</p>	1938-	43-	48-	53-	58-	63-	-43	-48	-53	-58	-63	-67	○	-	-	-	-	-		○	-	-	-	-			○	-	-	-				○	+	+					○	+						○	<table border="0"> <tr><td>1938-</td><td>43-</td><td>48-</td><td>53-</td><td>58-</td><td>63-</td></tr> <tr><td>-43</td><td>-48</td><td>-53</td><td>-58</td><td>-63</td><td>-67</td></tr> <tr><td>○</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td></td><td>○</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>○</td><td>+</td><td>-</td><td>+</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td>○</td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td>○</td><td>+</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>○</td></tr> </table> <p>$\alpha' : 5.0\%, \alpha'' : 1.6\%$ (2) : volume écoulé en crue</p>	1938-	43-	48-	53-	58-	63-	-43	-48	-53	-58	-63	-67	○	-	-	-	-	-		○	-	-	-	-			○	+	-	+				○	-	-					○	+						○
1938-	43-	48-	53-	58-	63-																																																																																												
-43	-48	-53	-58	-63	-67																																																																																												
○	-	-	-	-	-																																																																																												
	○	-	-	-	-																																																																																												
		○	-	-	-																																																																																												
			○	+	+																																																																																												
				○	+																																																																																												
					○																																																																																												
1938-	43-	48-	53-	58-	63-																																																																																												
-43	-48	-53	-58	-63	-67																																																																																												
○	-	-	-	-	-																																																																																												
	○	-	-	-	-																																																																																												
		○	+	-	+																																																																																												
			○	-	-																																																																																												
				○	+																																																																																												
					○																																																																																												
<table border="0"> <tr><td>1938-</td><td>43-</td><td>48-</td><td>53-</td><td>58-</td><td>63-</td></tr> <tr><td>-43</td><td>-48</td><td>-53</td><td>-58</td><td>-63</td><td>-67</td></tr> <tr><td>○</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td></tr> <tr><td></td><td>○</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>○</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td>○</td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td>○</td><td>+</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>○</td></tr> </table> <p>$\alpha' : 2.5\%, \alpha'' : 1.4\%$ (3) : déficit d'écoulement en étiage</p>	1938-	43-	48-	53-	58-	63-	-43	-48	-53	-58	-63	-67	○	+	+	+	+	+		○	+	+	+	+			○	+	+	+				○	-	-					○	+						○	<table border="0"> <tr><td>1938-</td><td>43-</td><td>48-</td><td>53-</td><td>58-</td><td>63-</td></tr> <tr><td>-43</td><td>-48</td><td>-53</td><td>-58</td><td>-63</td><td>-67</td></tr> <tr><td>○</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td></td><td>○</td><td>+</td><td>-</td><td>+</td><td>-</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>○</td><td>-</td><td>+</td><td>-</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td>○</td><td>+</td><td>+</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td>○</td><td>-</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>○</td></tr> </table> <p>$\alpha' : 14.6\%, \alpha'' : 8.0\%$ (4) : indice d'écoulement de base</p>	1938-	43-	48-	53-	58-	63-	-43	-48	-53	-58	-63	-67	○	-	-	-	-	-		○	+	-	+	-			○	-	+	-				○	+	+					○	-						○
1938-	43-	48-	53-	58-	63-																																																																																												
-43	-48	-53	-58	-63	-67																																																																																												
○	+	+	+	+	+																																																																																												
	○	+	+	+	+																																																																																												
		○	+	+	+																																																																																												
			○	-	-																																																																																												
				○	+																																																																																												
					○																																																																																												
1938-	43-	48-	53-	58-	63-																																																																																												
-43	-48	-53	-58	-63	-67																																																																																												
○	-	-	-	-	-																																																																																												
	○	+	-	+	-																																																																																												
		○	-	+	-																																																																																												
			○	+	+																																																																																												
				○	-																																																																																												
					○																																																																																												

Sur les trente premières années successives au reboisement du bassin 172 de Coshocton, on peut rejeter (sur la base de α'') l'hypothèse de stationnarité pour l'écoulement total, l'écoulement en crue, et l'écoulement en étiage. Clairement, le reboisement a pour effet de réduire les deux premières variables, et d'augmenter le déficit d'écoulement en période d'étiage. Ces résultats sont cohérents avec ceux de McGuinness et Harrold (1971), comme avec ceux issus d'autres bassins versants expérimentaux (voir Chapitre 2).

10.1.3 Le comportement hydrologique se stabilise après une trentaine d'années sous couvert forestier

Tableau 10.2 : les matrices de simulation croisées pour le bassin 172 de Coshocton sur la période 1976-1999 (couvert forestier stabilisé) ne laissent plus apparaître aucun changement

<table border="0"> <tr><td>1976-</td><td>81-</td><td>86-</td><td>91-</td><td>96-</td></tr> <tr><td>-81</td><td>-86</td><td>-91</td><td>-96</td><td>-99</td></tr> <tr><td>○</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td></td><td>○</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>○</td><td>-</td><td>+</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td>○</td><td>+</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td>○</td></tr> </table> <p>$\alpha' : 25\%, \alpha'' : 20\%$ (1) : écoulement total</p>	1976-	81-	86-	91-	96-	-81	-86	-91	-96	-99	○	-	-	-	-		○	+	+	+			○	-	+				○	+					○	<table border="0"> <tr><td>1976-</td><td>81-</td><td>86-</td><td>91-</td><td>96-</td></tr> <tr><td>-81</td><td>-86</td><td>-91</td><td>-96</td><td>-99</td></tr> <tr><td>○</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td></td><td>○</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>○</td><td>+</td><td>+</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td>○</td><td>-</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td>○</td></tr> </table> <p>$\alpha' : 50\%, \alpha'' : 18\%$ (2) : volume écoulé en crue</p>	1976-	81-	86-	91-	96-	-81	-86	-91	-96	-99	○	-	-	-	-		○	+	+	+			○	+	+				○	-					○
1976-	81-	86-	91-	96-																																																																			
-81	-86	-91	-96	-99																																																																			
○	-	-	-	-																																																																			
	○	+	+	+																																																																			
		○	-	+																																																																			
			○	+																																																																			
				○																																																																			
1976-	81-	86-	91-	96-																																																																			
-81	-86	-91	-96	-99																																																																			
○	-	-	-	-																																																																			
	○	+	+	+																																																																			
		○	+	+																																																																			
			○	-																																																																			
				○																																																																			
<table border="0"> <tr><td>1976-</td><td>81-</td><td>86-</td><td>91-</td><td>96-</td></tr> <tr><td>-81</td><td>-86</td><td>-91</td><td>-96</td><td>-99</td></tr> <tr><td>○</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td></tr> <tr><td></td><td>○</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>○</td><td>+</td><td>-</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td>○</td><td>-</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td>○</td></tr> </table> <p>$\alpha' : 50\%, \alpha'' : 38\%$ (3) : déficit d'écoulement en étiage</p>	1976-	81-	86-	91-	96-	-81	-86	-91	-96	-99	○	+	+	+	+		○	-	-	-			○	+	-				○	-					○	<table border="0"> <tr><td>1976-</td><td>81-</td><td>86-</td><td>91-</td><td>96-</td></tr> <tr><td>-81</td><td>-86</td><td>-91</td><td>-96</td><td>-99</td></tr> <tr><td>○</td><td>+</td><td>+</td><td>-</td><td>+</td></tr> <tr><td></td><td>○</td><td>+</td><td>-</td><td>+</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>○</td><td>-</td><td>+</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td>○</td><td>+</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td>○</td></tr> </table> <p>$\alpha' : 11\%, \alpha'' : 31\%$ (4) : indice d'écoulement de base</p>	1976-	81-	86-	91-	96-	-81	-86	-91	-96	-99	○	+	+	-	+		○	+	-	+			○	-	+				○	+					○
1976-	81-	86-	91-	96-																																																																			
-81	-86	-91	-96	-99																																																																			
○	+	+	+	+																																																																			
	○	-	-	-																																																																			
		○	+	-																																																																			
			○	-																																																																			
				○																																																																			
1976-	81-	86-	91-	96-																																																																			
-81	-86	-91	-96	-99																																																																			
○	+	+	-	+																																																																			
	○	+	-	+																																																																			
		○	-	+																																																																			
			○	+																																																																			
				○																																																																			

Sur la période 1976-1999 (Tableau 10.2) on observe une stationnarité de l'ensemble des variables hydrologiques considérées : une fois passée la période de croissance de la forêt et la période d'instabilité qui a pu suivre les opérations d'éclaircie (de 1967 à 1970), le comportement hydrologique du bassin versant ne montre donc plus aucun signe de non-stationnarité. Ces résultats sont concordants avec les observations de McGuinness et Harrold (1971), qui considéraient que le comportement du bassin s'était stabilisé dès la fin des années 1950, après une forte augmentation de l'évapotranspiration réelle suite au reboisement

Pour le bassin 172 de Coshocton, notre test a très bien joué son rôle, dès lors que nous avons pris l'initiative de distinguer deux périodes distinctes, sur la base d'une analyse hydrologique préalable. Il est intéressant de vérifier ce qui se serait passé si on lui avait demandé de juger de l'ensemble de la période 1938-1999 (Tableau 10.3).

10.1.4 Les tests statistiques sont mis en difficultés sur des périodes hétérogènes

Tableau 10.3 : matrices de simulation croisées pour le bassin 172 de Coshocton sur la totalité de la période disponible

1938- -43	43- -48	48- -53	53- -58	58- -63	63- -67	76- -81	81- -86	86- -91	91- -96	96- -99	1938- -43	43- -48	48- -53	53- -58	58- -63	63- -67	76- -81	81- -86	86- -91	91- -96	96- -99		
○	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	○	-	-	-	-	+	+	+	+	+		○	-	-	-	-	+	+	+	+	+	-	
		○	-	-	-	+	+	+	+	+			○	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
			○	+	+	+	+	+	+	+				○	-	-	+	-	+	+	+	+	
				○	+	+	+	+	+	+					○	+	+	+	+	+	+	+	
					○	+	+	+	+	+						○	+	+	+	+	+	+	
						○	+	+	+	+							○	+	+	+	+	+	
							○	+	+	+								○	+	+	+	+	
								○	+	+									○	+	+	+	
									○	+										○	+	+	
										○											○	+	
																						○	
																							○
					</																		

réduit par les coupes forestières, et généralement aggravé par des boisements. Mais toutes les expérimentations ont été faites à « sol constant », alors qu'en 60 ans d'état boisé, un sol a sans doute le temps de commencer certaines transformations (d'autant plus détectables que le sol était dégradé à l'origine : c'est ce qui avait justifié son reboisement).

- De façon similaire, l'indice d'écoulement de base semble bien augmenter progressivement tout au long de la période d'étude, alors que l'on n'avait rien détecté sur les deux périodes prises séparément. Il pourrait s'agir là à nouveau d'un effet à long terme du couvert forestier, faible et nécessitant donc une très longue période d'observation pour être détectable.

Les tendances à long terme sur les étiages et l'écoulement de base n'ont jamais été évoquées dans la littérature hydrologique « scientifique ». La seule référence de long terme dont nous puissions disposer est celle du bassin de Draix dans les Alpes de Haute Provence, où l'on a des données sur deux bassins voisins, dont l'un a été reboisé il y a plus d'un siècle et l'autre laissé dans son état dégradé d'origine (Richard et Mathys, 1999). Malheureusement, les données hydrométéorologiques ne couvrent que les quinze dernières années. Cependant, nous pouvons noter que l'évolution supposée à Coshocton va dans la même direction que l'évolution constatée à Draix, et cette direction est opposée à la direction des changements observables à court terme.

Pour confirmer notre observation, nous avons fait appel à un bassin de référence observé sur la même durée. Nous avons utilisé le bassin 196 de Coshocton, pour lequel les données de pluie et de débit sont disponibles sur la même durée que pour le bassin reboisé. Ce bassin a été utilisé par McGuinness et Harrold (1971) comme bassin de référence pour établir l'impact hydrologique du reboisement sur le bassin 172. Notons d'emblée que ce bassin n'est pas idéal pour servir de bassin de référence, pour des raisons d'échelle (il est 7 fois plus grand que le bassin reboisé avec une surface de 1.23 km²), et parce que c'est un lieu où ont été testées des nouvelles pratiques agricoles orientées vers la conservation des sols, qui peuvent avoir affecté le comportement hydrologique du bassin. Au point de vue occupation des sols, il est couvert de 40% de terres labourées, de 30% de prairies permanentes et de 30% de bois feuillus, éventuellement pâturés (aucune information n'est disponible sur d'éventuelles éclaircies dans ces bois tout au long de la période d'observation, ni sur la réelle stabilité de cette occupation des sols).

Le Tableau 10.4 présente les matrices de simulation croisées et le résultat des tests pour le bassin 196.

Tableau 10.4: matrices de simulations croisées pour un bassin de référence à Coshocton (bassin 196) sur la totalité de la période disponible

1938- -43	43- -48	48- -53	53- -58	58- -63	63- -67	76- -81	81- -86	86- -91	91- -96	96- -99	1938- -43	43- -48	48- -53	53- -58	58- -63	63- -67	76- -81	81- -86	86- -91	91- -96	96- -99	
○	-	-	-	-	-	+	-	+	+	-	○	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	
	○	-	-	-	-	+	+	+	+	+		○	-	-	-	-	+	-	-	+	-	
		○	+	+	+	+	+	+	+	+			○	+	+	+	+	+	+	+	+	-
			○	-	-	+	+	+	+	+				○	-	-	+	-	-	+	+	-
				○	-	+	+	+	+	+					○	+	+	-	-	+	+	-
					○	+	+	+	+	+						○	+	-	-	+	+	-
						○	-	-	-	-							○	-	-	-	-	-
							○	+	+	+								○	-	+	+	-
								○	+	-									○	+	-	-
									○	-										○	-	-
										○											○	-
																						○
$\alpha' : 11\%, \alpha'' : 19\%$											$\alpha' : 9\%, \alpha'' : 23\%$											
(1) : écoulement total											(2) : volume écoulé en crue											
1938- -43	43- -48	48- -53	53- -58	58- -63	63- -67	76- -81	81- -86	86- -91	91- -96	96- -99	1938- -43	43- -48	48- -53	53- -58	58- -63	63- -67	76- -81	81- -86	86- -91	91- -96	96- -99	
○	+	+	+	-	+	-	-	-	-	-	○	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	○	+	-	-	+	-	-	-	-	-		○	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
		○	-	+	-	-	-	-	-	-			○	-	+	-	+	+	+	+	+	+
			○	+	-	-	-	-	-	-				○	+	-	+	+	+	+	+	+
				○	+	-	-	-	-	-					○	-	+	+	+	+	+	+
					○	-	-	-	-	-						○	+	+	+	+	+	+
						○	+	+	+	+							○	+	+	+	+	+
							○	-	-	-								○	+	+	+	+
								○	-	-									○	-	-	+
									○	+										○	-	+
										○											○	+
																						○
$\alpha' : 1.5\%, \alpha'' : 0.7\%$											$\alpha' : 0.01\%, \alpha'' : 0.01\%$											
(3) : déficit d'écoulement en étiage											(4) : indice d'écoulement de base											

Le Tableau 10.4 montre, de façon surprenante que, sur le long terme, on observe les mêmes tendances sur l'écoulement en étiage et l'écoulement de base sur le bassin utilisé en contrôle. Il pourrait donc tout aussi bien s'agir d'un problème de météorologie, ou de l'impact de changements climatiques. En l'absence d'informations supplémentaires sur l'évolution des pratiques culturales sur ce bassin, il nous est difficile de conclure. Il faudrait disposer de données sur un bassin « garanti » stable à Coshocton.

En conclusion, il apparaît que dans la situation présente, nous ne pouvons pas formellement imputer l'augmentation de l'écoulement de base et la réduction du déficit en étiage à l'effet du couvert forestier sur le bassin reboisé.

10.2 Sur le bassin versant expérimental de Three Bar, on détecte certaines tendances brusques

10.2.1 Des bassins soumis à un changement brusque : incendie puis éradication du maquis

Les *Three Bar Experimental Watersheds* sont situés au centre de l'Arizona (Etats-Unis). Ces bassins ont été suivis par le *US Forest Service* entre 1956 et 1979 pour étudier l'impact hydrologique de la conversion du maquis (*chaparral*) en pâturage. L'objectif initial des expérimentateurs était de mettre en place un dispositif classique de bassins

Chapitre 10 : Des cas d'écoles pour valider les tests de détection des tendances

versants appariés (voir chapitre 2). L'expérience a été accélérée suite à un incendie accidentel qui est intervenu à peine trois ans après le début des mesures. Le Tableau 10.5 récapitule les traitements subis par chacun des quatre bassins (Hibbert, 1971; Hibbert et al., 1974).

Tableau 10.5 : récapitulatif des traitements subis par les bassins versants expérimentaux de Three Bar

Bassin	Incendie	Récupération	Traitement	
			type	période
B	1959	1960-1964	40% du bassin converti en pâturage	1965-1977
C	1959	-	100% du bassin converti en pâturage	1960-1979
D	1959	1960-1979	-	-
F	1959	1960-1968	100% du bassin converti en pâturage	1969-1979

On présente ici les résultats obtenus sur les bassins C et D, le premier offrant l'exemple d'un changement brusque (incendie + conversion) et le second l'exemple d'un changement brusque suivi d'un retour progressif à l'état initial.

Tableau 10.6 : interprétation des matrices de simulation croisées pour le bassin Three Bar C - incendie puis conversion du maquis en pâturage

<p>1956- 60- 63- 66- 69- 72- 75- -58 -63 -66 -69 -72 -75 -79</p> <p>○ + + + + + + ○ + + + + + + ○ - - - - - - ○ + + + ○ + - ○ - ○</p> <p>$\alpha' : 8.6\%, \alpha'' : 5.4\%$ (1) : écoulement total</p>	<p>1956- 60- 63- 66- 69- 72- 75- -58 -63 -66 -69 -72 -75 -79</p> <p>○ + + + + + + ○ + - + + + + ○ - - - - - - ○ + + + ○ + - ○ + - ○</p> <p>$\alpha' : 15\%, \alpha'' : 24\%$ (2) : volume écoulé en crue</p>
<p>1956- 60- 63- 66- 69- 72- 75- -58 -63 -66 -69 -72 -75 -79</p> <p>○ - - - - - - ○ - - - - - - ○ - + + + ○ + + + ○ - + ○ + ○</p> <p>$\alpha' : 25\%, \alpha'' : 2.1\%$ (3) : déficit d'écoulement en étiage</p>	<p>1956- 60- 63- 66- 69- 72- 75- -58 -63 -66 -69 -72 -75 -79</p> <p>○ + + + + + + ○ - - - - - - ○ + - - - - - ○ + - - - - - ○ - - - - - - ○ + - ○ - ○</p> <p>$\alpha' : 35\%, \alpha'' : 11\%$ (4) : indice d'écoulement de base</p>

Tableau 10.7 : interprétation des matrices de simulation croisées pour le bassin Three Bar D – incendie puis retour progressif à l'état de maquis

1956- -58	60- -63	63- -66	66- -69	69- -72	72- -75	75- -79	1956- -58	60- -63	63- -66	66- -69	69- -72	72- -75	75- -79
○	+	+	+	+	+	+	○	+	-	-	-	-	-
	○	-	-	-	+	-		○	-	-	-	-	-
		○	+	-	+	+			○	-	-	-	-
			○	-	+	-				○	+	+	+
				○	+	+					○	-	-
					○	-						○	-
						○							○
$\alpha' : 15\%, \alpha'' : 35\%$							$\alpha' : 5.0\%, \alpha'' : 8.4\%$						
(1) : écoulement total							(2) : volume écoulé en crue						
1956- -58	60- -63	63- -66	66- -69	69- -72	72- -75	75- -79	1956- -58	60- -63	63- -66	66- -69	69- -72	72- -75	75- -79
○	-	-	-	-	-	-	○	+	+	+	+	+	+
	○	+	-	+	-	-		○	-	+	-	+	+
		○	-	+	-	-			○	+	+	+	+
			○	+	+	+				○	-	-	-
				○	-	-					○	+	+
					○	+						○	+
						○							○
$\alpha' : 15\%, \alpha'' : 6.3\%$							$\alpha' : 5.0\%, \alpha'' : 1.2\%$						
(3) : déficit d'écoulement en étiage							(4) : indice d'écoulement de base						

▪ *Les tests requièrent des périodes de changement homogènes*

Sur les bassins Three Bar C (Tableau 10.6) et Three Bar D (Tableau 10.7), nos tests ne permettent pas d'identifier de premier abord d'évolution du comportement hydrologique, à l'exception d'une tendance à la réduction de déficit en étiage sur Three Bar C et d'une tendance à l'augmentation du débit de base sur Three Bar D (bassin que l'on laisse revenir à son état initial après l'incendie).

Ces deux tendances sont logiques. D'ailleurs, on sait dans le cas du bassin C, que l'incendie suivi de l'application d'herbicides a eu pour effet une augmentation notable de l'écoulement sur le bassin, ce dernier étant même passé d'intermittent à permanent à la suite de la conversion (Hibbert, 1971). Cependant, si l'on détecte bien sur l'ensemble des tableaux de simulations croisées la forte originalité du modèle calé avant l'incendie (56-58), le reste de la matrice, qui est relativement stable, cache cette singularité. Comme dans le cas de Coshocton précédemment, lorsque l'on avait tenté un diagnostic de stationnarité sur la période totale (Tableau 10.3), il nous faut conclure que **nos tests ne paraissent adaptés qu'à des tableaux homogènes du point de vue de l'évolution suspectée.**

Pour Three Bar C, on s'attendait à détecter une tendance négative sur le déficit en étiage (c'est à dire, une tendance à l'augmentation de l'écoulement en étiage à

mesure que l'éradication du maquis sur le bassin progresse), ce qui est le cas. Cependant, si on sépare la période en deux, on trouve bien deux tendances successives : le déficit d'écoulement commence par décroître entre 56-58 et 66-69 (α' : 2.5%, α'' : 2.8%), puis se stabilise entre 66-69 et 75-79 (α' : 5%, α'' : 28%). La première tendance est bien celle rapportée dans la littérature (Hibbert, 1971). La seconde tendance n'est pas étonnante : après une éradication complète du maquis, le couvert végétal s'est stabilisé, de même que la consommation en eau du bassin versant.

On n'observe pas de tendance similaire pour le bassin D, où le maquis peut se reconstituer. Cela peut s'expliquer par la vigueur et la rapidité de la reconquête de ce type de végétation : la couverture au sol qui était passée de 70% à 10% après l'incendie, remonte à 60% en à peine 10 ans (Hibbert, 1971). L'influence de l'incendie n'est donc que très passagère. En ce qui concerne la tendance à une évolution du débit de base sur le bassin D, elle est difficile à expliquer.

10.3 Sur le bassin versant de recherche du Réal Collobrier, on parvient à détecter les changements brusques liés à l'incendie, et on identifie une évolution lente insoupçonnée

Le bassin versant de recherche du Réal Collobrier est suivi par le Cemagref (Aix en Provence) depuis 1967. Situé en zone méditerranéenne, il est essentiellement couvert de maquis. L'intérêt de ce bassin pour notre étude réside dans le fait que certains sous-bassins ont été ravagés par un incendie en Août 1990, les autres étant épargnés (Lavabre et al., 1993). Nous utilisons ici un bassin entièrement brûlé (le Rimbaud, 1.5 km²) et deux bassins épargnés par l'incendie (Valescure, 9.25 km² et Vaubarnier, 1.5 km²). Les données de pluie et de débit, d'excellente qualité, sont disponibles sur la période 1967-2000.

10.3.1 Le Rimbaud, un bassin versant incendié en 1990

Le Tableau 10.8 présente les matrices de simulations obtenues ainsi que les résultats des tests statistiques :

Partie V – Identification de tendances au sein du comportement hydrologique

Tableau 10.8 : interprétation des matrices de simulation croisées pour le bassin du Rimbaud (BVRE du Réal Collobrier)– incendie en 1990

68- -71	71- -74	74- -77	77- -80	80- -83	83- -86	86- -89	90- -93	93- -96	96- -99	68- -71	71- -74	74- -77	77- -80	80- -83	83- -86	86- -89	90- -93	93- -96	96- -99	
○	+	+	+	-	+	+	+	+	-	○	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-
	○	+	-	-	+	-	+	+	-		○	+	+	+	+	+	+	+	+	-
		○	-	-	+	-	+	+	-			○	-	-	+	-	+	+	+	-
			○	-	+	+	+	+	-				○	-	+	-	+	+	+	-
				○	+	+	+	+	-					○	+	-	+	+	+	-
					○	-	+	-	-						○	-	+	+	+	-
						○	+	+	-							○	+	+	+	-
							○	-	-								○	-	-	-
								○	-									○	-	-
									○										○	-
																				○
$\alpha' : 31\%, \alpha'' : 35\%$										$\alpha' : 11\%, \alpha'' : 20\%$										
(1) : écoulement total										(2) : volume écoulé en crue										
68- -71	71- -74	74- -77	77- -80	80- -83	83- -86	86- -89	90- -93	93- -96	96- -99	68- -71	71- -74	74- -77	77- -80	80- -83	83- -86	86- -89	90- -93	93- -96	96- -99	
○	-	-	-	+	-	-	-	-	+	○	+	+	+	+	+	+	-	-	-	
	○	+	+	+	-	+	-	-	+		○	-	-	-	-	-	-	-	-	
		○	+	+	-	-	-	-	+			○	+	-	+	+	-	-	-	
			○	+	-	-	-	-	+				○	-	+	+	-	-	-	
				○	-	-	-	-	+					○	+	+	-	-	-	
					○	+	-	+	+						○	-	-	-	-	
						○	-	-	+							○	-	-	-	
							○	+	+								○	+	+	
								○	+									○	-	-
									○										○	-
$\alpha' : 40\%, \alpha'' : 44\%$										$\alpha' : 11\%, \alpha'' : 20\%$										
(3) : déficit d'écoulement en étiage										(4) : indice d'écoulement de base										

Sur l'ensemble de la période, les trois tests ne détectent aucune non-stationnarité des tableaux de simulations croisées. Ces résultats sont cohérents avec ce que l'on a déjà remarqué à deux reprises : les tests ne sont pas bien adaptés à la détection d'évolutions brusques. Mais un simple examen visuel des matrices¹ permet de trancher (Tableau 10.9) : l'incendie (en 1990) semble être suivi d'une forte augmentation de l'écoulement total et du volume en crue, et d'une réduction du déficit d'écoulement en étiage.

¹ On a ici recours au tableau normé, qui permet d'avoir une idée des amplitudes (sur une ligne, les valeurs sont normées par rapport à la valeur située sur la diagonale de la matrice).

- *Un simple examen visuel de la matrice suffit à détecter le changement brusque*

Tableau 10.9 : tableau normé des simulations croisées pour le bassin versant du Rimbaud (incendié en 1990).

68- -71	71- -74	74- -77	77- -80	80- -83	83- -86	86- -89	90- -93	93- -96	96- -99	68- -71	71- -74	74- -77	77- -80	80- -83	83- -86	86- -89	90- -93	93- -96	96- -99
100	104	105	103	99	114	104	144	112	86	100	100	108	101	100	113	101	195	125	80
98	100	100	100	97	108	100	123	104	87	101	100	104	101	101	110	100	148	111	88
97	99	100	99	96	108	99	128	105	85	97	96	100	97	98	106	97	146	108	85
97	100	101	100	96	110	100	131	106	84	99	99	104	100	100	112	99	173	117	83
102	108	110	107	100	119	108	165	121	85	99	97	114	98	100	120	99	322	154	73
87	90	91	90	86	100	90	124	97	73	87	88	96	88	87	100	89	186	113	70
95	100	101	99	94	111	100	142	108	80	98	99	107	100	98	111	100	203	126	81
61	65	66	64	60	74	65	100	72	50	37	37	42	37	36	42	38	100	53	29
91	94	95	94	90	102	94	123	100	79	85	85	89	86	84	93	85	142	100	71
118	123	124	121	118	137	123	181	133	100	117	116	123	117	119	128	117	194	134	100

(1) écoulement total

(2) écoulement en crue

Les deux tableaux ci-dessus permettent de constater que l'amplitude des variations successive à l'incendie est nettement supérieure au « bruit de fond » observable sur les périodes précédentes. On constate également que l'impact de l'incendie est de courte durée : tout semble presque rentré dans l'ordre pour la période 1993-1996 en ce qui concerne l'écoulement total (cette rapidité du retour à la normale a également été notée sur Three Bar D). En revanche, l'impact sur les crues semble un peu plus durable.

- **Un découpage adapté de la matrice permet la détection d'un changement brusque**

Pour comprendre comment le caractère brusque de la modification du comportement hydrologique influe sur la détection de non-stationnarité, il est intéressant de regarder ce que donnent les tests sur des périodes contenant une proportion variable de « désordres » consécutifs à l'incendie (Tableau 10.10) :

Tableau 10.10 : tests de non-stationnarité pour le bassin du Rimbaud (BVRE du Réal Collobrier) sur différentes périodes, incluant ou non l'incendie de 1990

Variable	<i>p-value α'</i>			
	1968-1989	1968-1993	1968-1996	1968-1999
(1) écoulement tot.	21%	3.4%	3.5%	35%
(2) crues	25%	3.2%	1.6%	20%
(3) étiage	19%	3.2%	5.1%	44%
(4) BFI	9%	37%	31%	20%

Le Tableau 10.10 montre qu'il est possible de détecter le changement brusque sur l'écoulement total, les crues et les étiages (décelable par un examen visuel des tableaux de simulations croisées), à condition que cet effet soit situé à l'extrémité de la matrice. L'impact de l'incendie est détectable par le test quand les deux périodes les plus affectées (1990-1993 et 1993-1996) sont en extrémité de la matrice. Il ne l'est plus à partir du moment où l'on ajoute la période 1996-1999 (cet effet de dilution est d'autant plus accentué que l'on semble observer au Tableau 10.9 sur cette dernière période une véritable inversion de tendance qui va au-delà d'un simple retour à la normale¹).

10.3.2 Vaubarnier et Valescure : deux bassins épargnés par l'incendie de 1990... se révèlent eux-aussi non-stationnaires

Pour conforter l'analyse que nous venons de mener sur le Rimbaud, il nous a semblé intéressant de faire porter les mêmes tests à deux sous-bassins voisins épargnés par l'incendie, Vaubarnier (1.5 km²) et Valescure (9.25 km²). Ces deux bassins ont été suivis sur la même période, Valescure étant, malgré sa différence de taille avec le Rimbaud, considéré comme le meilleur bassin de référence, Vaubarnier ayant une très longue « mémoire » des sécheresses (Jacques Lavabre, communication personnelle). Les résultats des tests sont présentés au Tableau 10.11 et au Tableau 10.12.

¹ L'inversion de tendance constatée n'est pas surprenante, elle a été rapportée par des auteurs tels que Hornbeck et al. (1993), Hornbeck et al. (1997) et Kuczera (1987) : voir chapitre 9.

Tableau 10.11 : interprétation des matrices de simulation croisées pour le bassin du Vaubarnier (BVRE du Réal Collobrier)- épargné par l'incendie de 1990

68- -71	71- -74	74- -77	77- -80	80- -83	83- -86	86- -89	90- -93	93- -96	96- -99	68- -71	71- -74	74- -77	77- -80	80- -83	83- -86	86- -89	90- -93	93- -96	96- -99
○	+	-	+	-	+	+	-	-	-	○	+	-	-	-	+	-	-	-	-
	○	-	-	-	+	-	-	-	-		○	-	-	-	-	-	-	-	-
		○	+	-	+	+	-	-	-			○	+	-	+	-	-	-	-
			○	-	+	-	-	-	-				○	-	+	-	-	-	-
				○	+	+	-	+	+					○	+	-	-	-	-
					○	-	-	-	-							○	-	-	-
						○	-	-	-								○	-	+
							○	+	+									○	+
								○	-										○
									○										
$\alpha' : 8.6\%, \alpha'' : 3.9\%$										$\alpha' : 0.5\%, \alpha'' : 0.6\%$									
(1) : écoulement total										(2) : volume écoulé en crue									
68- -71	71- -74	74- -77	77- -80	80- -83	83- -86	86- -89	90- -93	93- -96	96- -99	68- -71	71- -74	74- -77	77- -80	80- -83	83- -86	86- -89	90- -93	93- -96	96- -99
○	-	-	-	+	-	-	+	+	+	○	+	+	+	-	+	+	-	+	+
	○	+	+	+	-	-	+	+	+		○	-	+	-	+	+	-	-	-
		○	-	+	-	-	+	+	+			○	+	-	+	+	-	-	-
			○	+	-	-	+	+	+				○	-	+	+	-	-	-
				○	-	-	+	-	-					○	+	+	-	+	+
					○	+	+	+	+						○	+	-	-	-
						○	+	+	+							○	-	-	-
							○	-	-								○	+	+
								○	+									○	-
									○										○
$\alpha' : 19\%, \alpha'' : 13\%$										$\alpha' : 50\%, \alpha'' : 44\%$									
(3) : déficit d'écoulement en étiage										(4) : indice d'écoulement de base									

Tableau 10.12 : interprétation des matrices de simulation croisées pour le bassin du Valescure (BVRE du Réal Collobrier)– épargné par l’incendie de 1990

68- -71	71- -74	74- -77	77- -80	80- -83	83- -86	86- -89	90- -93	93- -96	96- -99	68- -71	71- -74	74- -77	77- -80	80- -83	83- -86	86- -89	90- -93	93- -96	96- -99
○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	○	-	+	-	-	-	-	-	-		○	+	+	-	+	-	-	-	-
		○	+	-	+	-	-	-	-			○	+	-	+	-	-	-	-
			○	-	-	-	-	-	-				○	-	-	-	-	-	-
				○	+	-	-	+	-					○	-	-	-	-	-
					○	-	-	-	-						○	-	-	-	-
						○	-	+	-							○	+	+	+
							○	+	-								○	+	-
								○	-									○	-
									○										○
$\alpha' : 0.1\%, \alpha'' : 0.2\%$										$\alpha' : 0.5\%, \alpha'' : 1.8\%$									
(1) : écoulement total										(2) : volume écoulé en crue									
68- -71	71- -74	74- -77	77- -80	80- -83	83- -86	86- -89	90- -93	93- -96	96- -99	68- -71	71- -74	74- -77	77- -80	80- -83	83- -86	86- -89	90- -93	93- -96	96- -99
○	-	+	-	+	+	+	+	+	+	○	+	+	+	-	+	+	-	+	-
	○	+	+	+	+	+	+	+	+		○	-	-	-	-	-	-	-	-
		○	-	+	-	+	+	+	+			○	-	-	+	-	-	-	-
			○	+	+	+	+	+	+				○	-	+	+	-	-	-
				○	-	-	+	-	-					○	+	+	+	+	+
					○	+	+	+	+						○	+	-	-	-
						○	+	-	+							○	-	-	-
							○	-	-								○	+	+
								○	+									○	-
									○										○
$\alpha' : 0.9\%, \alpha'' : 1.2\%$										$\alpha' : 9\%, \alpha'' : 23\%$									
(3) : déficit d’écoulement en étiage										(4) : indice d’écoulement de base									

L’analyse des résultats du bassin de Vaubarnier et de celui de Valescure est très surprenante, dans la mesure où l’on observe sur Valescure une non-stationnarité bien plus claire que sur le Rimbaud, pour les variables d’écoulement total, d’écoulement en crue et d’écoulement en étiage. Il n’y a pas de tendance sur l’écoulement de base. Sur le Vaubarnier, la non-stationnarité sur l’écoulement en crue est claire, un peu moins accentuée pour l’écoulement total. Là non plus, il n’y a pas de non-stationnarité apparente sur l’écoulement de base.

Pour ce qui est de la non-stationnarité observée sur les crues et l’écoulement total, il s’agit d’une diminution progressive sur Vaubarnier et Valescure (contrairement au Rimbaud où l’incendie avait été suivie d’une augmentation).

Pour ce qui est du déficit d’écoulement en étiage, Valescure montre une augmentation du déficit d’écoulement, alors que ce qui était détecté sur le Rimbaud suite à l’incendie était une diminution de ce déficit. La non-stationnarité que nous avons détectée sur ce que nous croyions être des bassins de référence stables est donc d’une autre nature¹. Elle correspond, d’après la littérature et d’après les résultats du

¹ Il faut noter que si l’on observe les tableaux normés des simulations croisées pour les deux bassins, on n’observe pas de singularités telles que celles du Tableau 10.9, mais une évolution lente et progressive.

bassin de Coshocton, à ce que l'on peut attendre suite à une densification progressive d'un couvert forestier.

- *Les non-stationnarités observées sur le Rimbaud, Valescure et Vaubarnier sont de nature différentes*

Pour illustrer la différence des non stationnarités identifiées par notre test sur les trois sous-bassins versants du Réal Collobrier, nous présentons en Figure 10.1 le comportement du risque de première espèce α' sur différentes périodes incluant ou non l'incendie de 1990.

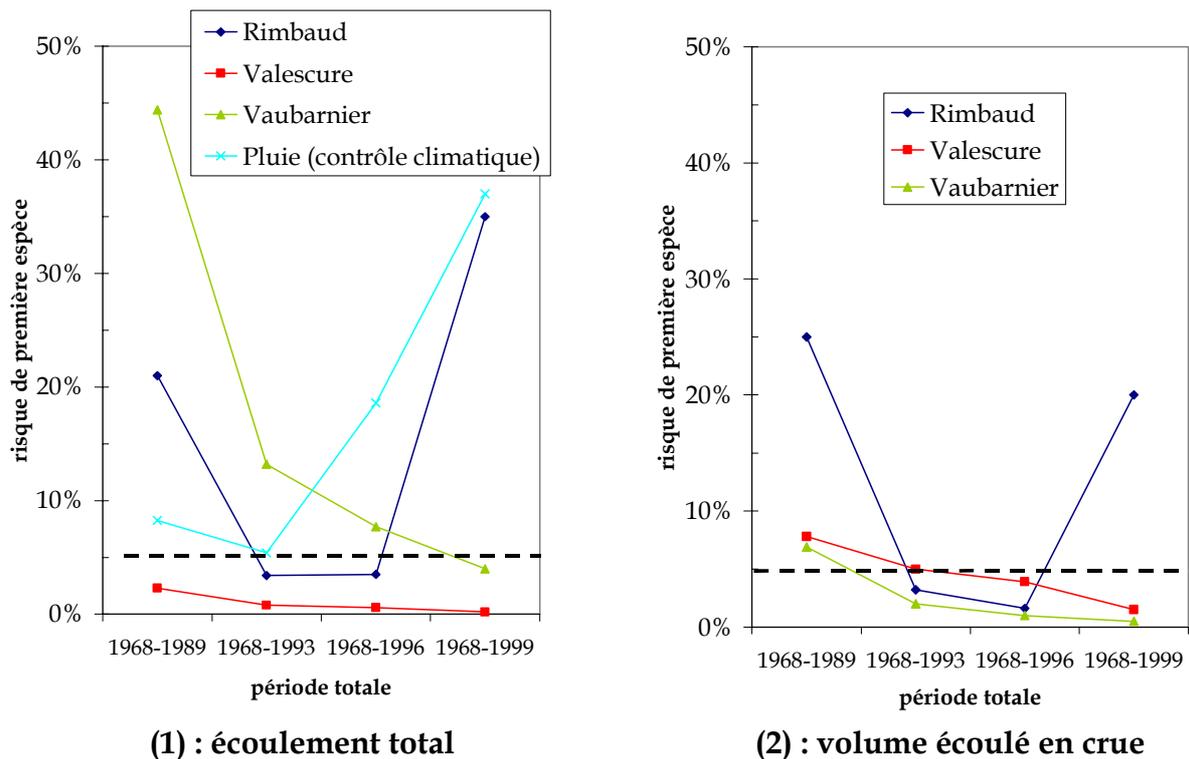


Figure 10.1 : évolution du risque de première espèce α' , sur différentes périodes totales de calcul du test (incluant ou non l'incendie de 1990), pour les trois sous-bassins du Réal Collobrier

La Figure 10.1 montre bien l'influence d'une non-stationnarité brusque et passagère pour le Rimbaud, où le risque α' ne fait que passer temporairement en dessous de la barre des 5%. Pour Valescure, la figure illustre l'effet de l'augmentation du nombre de périodes d'observation, qui réduit progressivement le risque de première espèce, dans le cas d'une évolution progressive. Pour Vaubarnier, on pourrait se trouver dans le cas du Rimbaud en ce qui concerne l'écoulement total, mais avec une persistance plus importante de l'effet des quatre années de sécheresse (1988 à 1991). Pour ce qui est des crues, Vaubarnier ressemble plutôt à Valescure.

Sur cette même figure, en (1), on a fait figurer à titre de comparaison les résultats d'un test de permutation sur les pluies, calculé de façon identique aux débits. L'objectif est de savoir si les tendances observées sur les débits peuvent être corrélées

à des non-stationnarités des pluies. Cette interrogation est justifiée dans la mesure où 1) même s'il est supposé s'affranchir de la pluie, un modèle tel que GR4J garde une certaine dépendance vis à vis de celle-ci, et 2) on observe une différence assez nette de pluviométrie, ainsi que de répartition temporelle des pluies, entre les années 1970 et 1980 (J. Lavabre, communication personnelle).

Pour la période 1968-1993, on constate que l'on frôle le seuil des 5%, et que la courbe des pluies a la même allure que celle des écoulements annuels et du volume en crue pour le Rimbaud. Ceci pourrait laisser croire à un artefact pour le Rimbaud, ce qui serait un peu paradoxal, dans la mesure où ce bassin est celui où les non-stationnarités liées à l'incendie ont été le mieux documentées ! En tout cas, cela nous permet de conclure que les non-stationnarités observées sur le Valescure et le Vaubarnier ne sont probablement pas des artefacts liées à l'évolution des pluies.

10.3.3 Conclusion sur les sous-bassins du Réal Collobrier

L'exemple du bassin versant du Rimbaud, suivi sur la période 1968-1999 et incendié en 1990, permet de dire qu'une non-stationnarité forte mais passagère du comportement hydrologique n'est pas facilement détectable avec les tests que nous avons proposés. Dans ce cas, c'est un examen visuel qui permet de conclure le plus directement.

Le bassin versant de Valescure (et dans une moindre mesure le bassin versant de Vaubarnier) semble évoluer à la manière d'un bassin versant dont le couvert se densifierait progressivement (grâce à la protection contre l'incendie pendant les trente ans de suivi par exemple), engendrant une augmentation de la consommation en eau de la végétation¹ (par transpiration ou interception).

10.4 Le bassin versant de référence (BV2) d'Andrews Experimental Forest est stable, sauf pour l'écoulement de base

Les résultats surprenants obtenus sur les bassins versants considérés comme stables au sein du Réal Collobrier nous ont incité à rechercher une validation de nos tests sur un bassin versant dont le couvert forestier puisse être « garanti » comme stable. Nous avons opté pour le BV n°2 d'Andrews Experimental Forest. Ce bassin versant de contrôle est suivi depuis 50 ans et couvert d'une forêt primaire (« *old-growth forest* ») dont l'âge atteint 250 ans (David Post, communication personnelle). Dans ces conditions, et à l'abri de toute exploitation, le comportement du bassin versant devrait être stationnaire.

Les données de pluie et de débit étaient disponibles, au pas de temps journalier, sur un peu plus de quarante ans (1958-1999). Pour l'évapotranspiration potentielle, nous avons utilisé les données des stations d'Eugène et Redmond, en moyennes interannuelles. Les résultats sont présentés au Tableau 10.13.

¹ Nous n'avons malheureusement pas de données d'inventaire forestier nous permettant de vérifier cette hypothèse sur le terrain.

Chapitre 10 : Des cas d'écoles pour valider les tests de détection des tendances

Les performances du modèle GR4J sur ce petit bassin sont excellentes (voir annexe V.1).

Tableau 10.13 : interprétation des matrices de simulation croisées pour le bassin n°2 d'Andrews Exp. Forest- bassin de référence couvert par une forêt « ancienne »

1958- -63	63- -68	68- -73	73- -78	78- -83	83- -88	88- -93	93- -99		1958- -63	63- -68	68- -73	73- -78	78- -83	83- -88	88- -93	93- -99		
○	-	-	+	-	-	-	-		○	-	-	+	+	-	-	-	+	
	○	+	+	+	-	-	+			○	+	+	+	+	-	-	+	
		○	+	+	-	-	+				○	+	+	+	-	-	+	
			○	-	-	-	-					○	-	-	-	-	-	
				○	-	-	+						○	-	-	-	+	
					○	+	+								○	-	+	
						○	+									○	+	
							○										○	
$\alpha' : 31\%, \alpha'' : 21\%, \alpha''' : 23\%$									$\alpha' : 25\%, \alpha'' : 33\%, \alpha''' : 38\%$									
(1) : écoulement total									(2) : volume écoulé en crue									
1958- -63	63- -68	68- -73	73- -78	78- -83	83- -88	88- -93	93- -99		1958- -63	63- -68	68- -73	73- -78	78- -83	83- -88	88- -93	93- -99		
○	+	+	-	+	+	+	+		○	+	-	+	-	-	-	-		
	○	-	-	+	+	-	+			○	-	+	-	-	-	-		
		○	-	+	+	-	+				○	+	-	-	-	-		
			○	+	+	+	+					○	-	-	-	-		
				○	+	-	+						○	+	+	+		
					○	-	-							○	-	-		
						○	+								○	-		
							○									○		
$\alpha' : 11.2\%, \alpha'' : 12.7\%, \alpha''' : 17\%$									$\alpha' : 5.0\%, \alpha'' : 4.0\%, \alpha''' : 0.9\%$									
(3) : déficit d'écoulement en étiage									(4) : indice d'écoulement de base									

En ce qui concerne l'écoulement total (1), l'écoulement en crue (2), et le déficit d'écoulement en étiage (3) les résultats sont tout à fait conformes à ce que l'on attendait : il n'y a aucune tendance décelable. En revanche, on identifie une tendance pour ce qui est de l'écoulement de base (4). Il est intéressant que cette tendance ne se produit pas dans le même sens que celle qui avait été détectée sur les bassins 172 et 196 de Coshocton. A Andrews, l'écoulement de base a tendance à diminuer.

Si l'on augmente le nombre de périodes (le nombre de colonnes du tableau), la tendance pour l'écoulement de base se renforce : avec n=10 colonnes (périodes de 5 ans¹), on obtient $\alpha'=0.3\%$, $\alpha''=0.2\%$; avec n=13 colonnes (périodes de 4 ans), on obtient $\alpha'=1.0\%$, $\alpha''=0.2\%$. On observe alors une tendance pour l'écoulement en étiage : $\alpha''=4.4\%$ pour n=13 et $\alpha''=2.1\%$ pour n=10 : ce n'est pas très étonnant car nous avons déjà eu l'occasion de noter qu'en cas de tendances, ces deux variables allaient généralement de pair.

Plusieurs hypothèses peuvent être formulées pour expliquer ces observations :

- D'une part, il pourrait s'agir d'une réaction du peuplement forestier à un changement climatique. L'augmentation de la température moyenne annuelle

¹ Dont une année d'initialisation.

(entraînant un allongement de la saison de végétation et une augmentation de la demande évaporative pourrait être invoqué, mais on a du mal à expliquer pourquoi l'écoulement total ne serait pas affecté.

- On peut également imaginer une explication météorologique : le seuil en V mince se serait usé imperceptiblement au cours des 50 années de suivi, de telle sorte qu'à un même débit correspondrait une hauteur d'eau un peu inférieure. Ceci pourrait très bien n'affecter que les faibles débits. Dans ce cas, la tendance observée ne serait qu'un artefact météorologique.

10.5 Impact du nombre de périodes sur la puissance du test de détection de tendances

Dans cette section, nous avons choisi de nous concentrer sur le bassin 172 de Coshocton et sur le bassin du Rimbaud, pour lesquels nous sommes en présence de changements respectivement graduels et brusques. A Coshocton, on a pu identifier une première période d'évolution graduelle du comportement hydrologique du bassin versant. Sur le Rimbaud, un incendie a modifié de façon importante mais éphémère le comportement hydrologique du bassin versant. On a constaté que nos tests n'arrivaient pas bien à détecter de non-stationnarité dans ce dernier cas, lorsque le changement brusque était noyé dans une période stable très longue.

Nous avons cherché à étudier l'impact du nombre de périodes de calage sur les risques de première espèce calculés par les trois tests statistiques proposés. Pour cela, nous avons retenu la variable « écoulement total », et on a fait varier la longueur des périodes de calage de 2 à 7 ans.

10.5.1 Cas d'évolution progressive (Coshocton)

Les résultats sont présentés au Tableau 10.14 pour la période de non-stationnarité présumée (1938-1967, correspondant aux trente premières années suivant le boisement du bassin) et au Tableau 10.15 pour la période de stationnarité présumée (1976-1999).

Tableau 10.14 : tableaux de simulations croisées obtenus pour l'écoulement total sur le bassin 172 de Coshocton, pour différentes durées de calage, pendant la période de non-stationnarité présumée (« n ans » signifie une année d'initialisation plus n années de calage)

Périodes de 2 ans													
1938-	40-	42-	44-	46-	48-	50-	52-	54-	56-	58-	60-	62-	64-
-40	-42	-44	-46	-48	-50	-52	-54	-56	-58	-60	-62	-64	-67
○	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
				○	-	-	-	-	-	-	-	-	-
					○	+	-	-	+	-	-	-	+
						○	-	-	-	-	-	-	-
							○	+	+	+	+	+	+
								○	+	-	-	-	+
									○	-	-	-	+
										○	+	-	+
											○	-	+
												○	+
													○
$\alpha' : 0.04\%, \alpha'' : <0.01\%$													
Périodes de 3 ans													
1938-	41-	44-	47-	50-	53-	56-	59-	62-	65-				
-41	-44	-47	-50	-53	-56	-59	-62	-65	-67				
	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
		○	-	-	-	-	-	-	-	-			
			○	-	-	-	-	-	-	-			
				○	-	-	-	-	-	+			
					○	-	-	-	-	+			
						○	+	+	-	+			
							○	-	-	+			
								○	-	+			
									○	+			
										○			
$\alpha' : 0.25\%, \alpha'' : 0.49\%$													
Périodes de 4 ans							Périodes de 5 ans						
1938-	42-	46-	50-	54-	58-	62-	1938-	43-	48-	53-	58-	63-	
-42	-46	-50	-54	-58	-62	-67	-43	-48	-53	-58	-63	-67	
○	-	-	-	-	-	-	○	-	-	-	-	-	
	○	-	-	-	-	-		○	-	-	-	-	
		○	-	-	-	-			○	-	-	-	
			○	+	+	+				○	+	+	
				○	-	-					○	+	
					○	+						○	
						○							
$\alpha' : 2.5\%, \alpha'' : 0.38\%$							$\alpha' : 5.0\%, \alpha'' : 1.0\%$						
Périodes de 6 ans					Périodes de 7 ans								
1938-	44-	50-	56-	62-	1938-	45-	52-	59-					
-44	-50	-56	-62	-67	-45	-52	-59	-67					
○	-	-	-	-	○	-	-	-					
	○	-	-	-		○	-	-					
		○	+	+			○	+					
			○	+				○					
				○									
$\alpha' : 11.2\%, \alpha'' : 4.9\%$					$\alpha' : 5\%, \alpha'' : 8.3\%$								

Partie V – Identification de tendances au sein du comportement hydrologique

Tableau 10.15 : tableaux de simulations croisées obtenus pour l'écoulement total sur le bassin 172 de Coshocton, pour différentes durées de calage, pendant la période 1976-99 (stationnarité présumée)

Périodes de 2 ans											
1976-	78-	80-	82-	84-	86-	88-	90-	92-	94-	96-	
-78	-80	-82	-84	-86	-88	-90	-92	-94	-96	-99	
○	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		○	-	-	-	+	+	+	+	+	
			○	-	-	+	+	+	+	+	
				○	-	+	+	+	+	+	
					○	+	+	+	+	+	
						○	-	-	-	-	
							○	+	+	-	
								○	+	-	
									○	-	
										○	
$\alpha' : 30\%, \alpha'' : 14\%$											
Périodes de 3 ans											
1976-	79-	82-	85-	88-	91-	94-	97-				
-79	-82	-85	-88	-91	-94	-97	-99				
○	-	-	-	-	-	-	-				
	○	-	-	+	-	-	-				
		○	-	+	+	+	-				
			○	+	+	+	+				
				○	-	-	-				
					○	+	-				
						○	-				
							○				
$\alpha' : 11\%, \alpha'' : 7.9\%$											
Périodes de 4 ans						Périodes de 5 ans					
1976-	80-	84-	88-	92-	96-	1976-	81-	86-	91-	96-	
-80	-84	-88	-92	-96	-99	-81	-86	-91	-96	-99	
○	-	-	-	-	-	○	-	-	-	-	
	○	-	+	+	+		○	+	+	+	
		○	+	+	+			○	-	+	
			○	-	-				○	+	
				○	-					○	
					○						○
$\alpha' : 25\%, \alpha'' : 35\%$						$\alpha' : 25\%, \alpha'' : 20\%$					
Périodes de 6 ans					Périodes de 7 ans						
1976-	82-	88-	94-		1976-	83-	90-				
-82	-88	-94	-99		-83	-90	-97				
○	-	-	-		○	-	-				
	○	+	+			○	+				
		○	-				○				
			○								
$\alpha' : 25\%, \alpha'' : 46\%$					$\alpha' : 50\%$						

Pour les deux bassins étudiés, les tests réagissent bien : leurs résultats sont constants, ce qui montre que la détection de tendance ne dépend pas du choix de la longueur des périodes de calage.

En revanche, le nombre de périodes semble avoir un effet net sur l'incertitude associée à la détection d'un changement quand celui-ci a lieu : la *p-value* est d'autant moins importante que le nombre de périodes est grand. Ce résultat est intéressant : s'il semble logique, il n'était pas nécessairement prévisible, dans la mesure où des périodes de calage plus courtes peuvent aussi avoir pour conséquence de réduire la qualité des calages¹ et ainsi d'introduire du bruit dans les tableaux de simulations croisées.

10.5.2 Cas d'évolution brutale (Rimbaud)

Pour le bassin versant du Rimbaud, nous devons prendre en compte le fait que la possibilité de détecter ou non la non-stationnarité dépendait de la période totale considérée pour l'application du test. Nous avons donc choisi d'étudier à la fois l'impact de la longueur des périodes de calage avec l'ensemble de la période disponible (1968-1999, sur laquelle une longueur « standard » ne détectait pas de non-stationnarité) et d'étudier cet impact sur une période plus courte (1968-1996 par exemple), sur laquelle une longueur standard détectait une non-stationnarité. Les résultats sont présentés en Figure 10.2 :

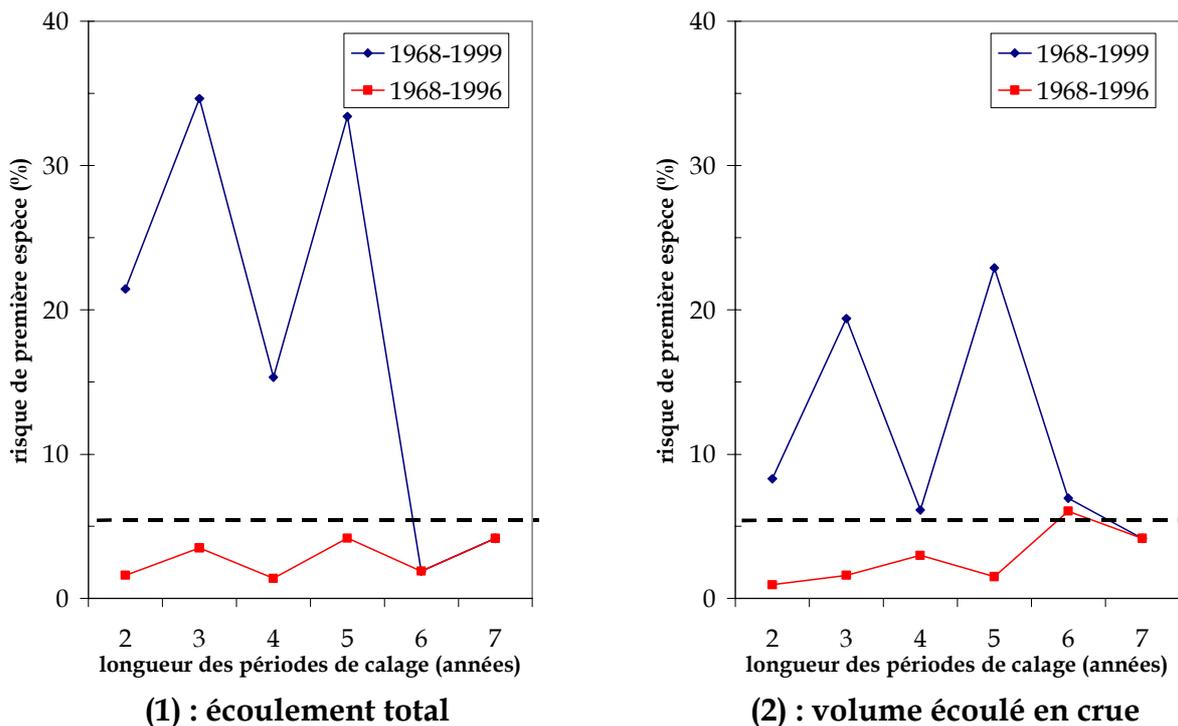


Figure 10.2 : évolution du risque de première espèce α' , selon la longueur (et donc le nombre) des périodes de calage du modèle pluie-débit, pour le bassin du Rimbaud, pour les périodes 1968-1996 et 1968-1999 (date de l'incendie : 1990).

Il est intéressant de constater que, pour un changement brutal de comportement hydrologique suivi d'un retour à la normale, le test n'est pas amélioré sensiblement

¹ Cette tendance est particulièrement forte pour des bassins intermittents arides et semi-arides, où la réponse du bassin est le fait de quelques événements pluvieux seulement.

par l'augmentation du nombre de périodes de calage. C'est plutôt la tendance inverse que l'on retrouve, une évolution brutale arrivant mieux à se faire sentir sur un petit nombre de périodes de calage. Cependant, nous pensons que dans ce dernier cas, l'élément essentiel est plutôt le fait que la période affectée par l'incendie se trouve à une extrémité de la matrice, ce qui la rend plus apparente dans le cas d'un test de permutations.

10.6 Conclusion du chapitre 10

A l'issue de cette validation de nos tests sur des cas d'école, nous avons démontré leur efficacité à mettre en évidence des tendances progressives. Nous avons également une vision claire de leurs limites :

- ces tests permettent de détecter les évolutions du comportement hydrologique, mais ne permettent pas de dire s'il y a une tendance monotone dans la période considérée. L'exemple du Tableau 10.3 avec le bassin versant 172 de Coshocton illustre le fait que l'on ne peut pas se passer d'une analyse hydrologique préalable au test, notamment pour décider des périodes sur lesquelles le test doit porter;
- certaines périodes très particulières peuvent avoir un poids déterminant dans le rejet de l'hypothèse H_0 , soit que ces périodes correspondent réellement à une discontinuité (incendie comme sur le Rimbaud ou les bassins de Three Bar), soit qu'il s'agisse d'une période où le modèle pluie-débit a été mis en difficulté (suite à une sécheresse ou à une chute de neige que le modèle n'aurait pas su gérer);
- enfin, il faut rappeler que les tests présentés n'ont de sens que si le modèle utilisé permet une représentation correcte de la relation pluie-débit sur le bassin versant étudié. Sans cela, il est impossible de conclure.

CONCLUSION DE LA CINQUIEME PARTIE

Au cours de la cinquième partie, nous avons cherché à développer des méthodes permettant de détecter une non-stationnarité dans le comportement hydrologique d'un bassin versant.

Nous avons ainsi développé trois tests de complexité croissante, pouvant être appliqués à une caractéristique hydrologique du bassin, telle que l'écoulement total, l'écoulement en crue ou en étiage, l'écoulement de base.

Ces trois tests ont été validés sur des bassins versants expérimentaux et ont pu ainsi faire la preuve de leur capacité à détecter des changements progressifs tels que ceux qui interviennent lors de la croissance d'un couvert forestier sur un bassin versant initialement en culture.

En revanche, leurs performances sont inégales pour ce qui est de la détection de tendances brutales. Dans ce cas cependant, nous avons montré que les tableaux de simulations croisées fournissaient un support simple d'interprétation visuelle.

A présent, confiants dans les capacités de nos tests de détection de tendances, nous passons dans la partie suivante à une application à notre échantillon du Massif central, puis à une confrontation des tendances hydrologiques et forestières.

Partie VI – Le couvert forestier peut-il expliquer la non-stationnarité des bassins versants du Massif central?

L'objectif de cette sixième partie est de mettre en œuvre les techniques de détection des non-stationnarités développées précédemment sur un échantillon de bassins versants dispersés au sein du Massif central, puis de rechercher les facteurs pouvant expliquer les évolutions constatées.

Au chapitre 11, nous appliquons nos trois tests à l'ensemble de notre échantillon d'étude, et discutons de la portée des résultats obtenus. Rappelons que ces trois tests consistent pour le premier en un test du signe sur les matrices de simulations croisées (α'), pour le second en un test conditionnel aux données prenant en compte l'amplitude des variations au sein des matrices (α'), pour le troisième en un test conditionnel aux données appliquées cette fois-ci à des distributions des variables hydrologiques étudiées.

Puis, au chapitre 12, nous recherchons les liens possibles entre les non-stationnarités hydrologiques constatées au chapitre 11, et l'évolution du couvert forestier, documentée en partie IV.

11 APPLICATION DES TESTS DE DETECTION DE NON-STATIONNARITE A L'ECHANTILLON DE 63 BASSINS VERSANTS DU MASSIF CENTRAL

Nous commençons ce chapitre par une présentation des résultats obtenus par une application « systématique¹ » de nos trois tests de détection des non-stationnarités à l'échantillon des 63 bassins versants du Massif central. Ensuite, nous discutons le cas des bassins disposant d'une longue période d'observation, et où peuvent co-exister deux tendances successives (qui n'auraient pas alors pu être détectées par l'application « systématique »). Enfin, nous examinons quelques cas particuliers de changements d'occupation des sols.

11.1 Synthèse des résultats dans le Massif central

Les tableaux de simulations croisés correspondant aux bassins du Massif central sont présentés en Annexe VI.1 et VI.2, et les p-value correspondantes en Annexe VI.3. Nous donnons au Tableau 11.1 une synthèse des résultats obtenus en appliquant les trois tests de détection de tendance à l'échantillon de 63 bassins versants du Massif central. Nous avons fait figurer les pourcentages de l'échantillon correspondant respectivement à des risques de première espèce de 0.025, 0.05 et 0.10.

Tableau 11.1: résultats de la recherche des non-stationnarités dans les bassins versants du Massif central (statistiques calculées sur 63 bassins versants au total)

Pourcentage des bassins versants de l'échantillon pour lesquels la <i>p-value</i> est	Type de test		
	1 (α')	2 (α'')	3 (α''')
<i>Écoulement total (1)</i>			
<0.025	19%	16%	17%
<0.05	39%	33%	31%
<0.10	53%	47%	48%
<i>Écoulement en crue (2)</i>			
<0.025	13%	6%	11%
<0.05	25%	16%	16%
<0.10	33%	27%	34%
<i>Déficit d'écoulement en étiage (3)</i>			
<0.025	19%	17%	19%
<0.05	33%	27%	25%
<0.10	44%	53%	50%
<i>Écoulement de base (4)</i>			
<0.025	17%	13%	9%
<0.05	25%	25%	22%
<0.10	28%	34%	30%

¹ L'application « systématique » des tests correspond à une application prenant en compte l'ensemble de la période disponible pour chaque bassin.

Le Tableau 11.1 montre qu'**une assez forte proportion des bassins versants de notre échantillon est identifiée comme non-stationnaire**. Si l'on se fie au test fondé sur la permutation des tableaux croisés (risque de première espèce : α') et à une valeur seuil de 5%, plus de 30% des bassins versants présentent une non-stationnarité pour l'écoulement total.

Pour approfondir notre analyse, nous avons cherché à voir si l'on pouvait identifier une direction de changement commune pour les bassins versants reconnus comme non-stationnaires. Pour cela, nous présentons au Tableau 11.2 la répartition du sens d'évolution pour les bassins dont la p-value était inférieure à 5% (rappelons que le sens d'évolution est défini par le signe majoritaire du tableau des simulations croisées exprimé en '+' et '-', tel qu'il est défini au chapitre 9).

Tableau 11.2 : répartition par signe des bassins versants identifiés comme non-stationnaires (p value < 5%) par le test 2 (test des permutations sur les tableaux croisés, α')

Bassins versants identifiés comme non-stationnaires (p value < 5%) pour :	-	+	Nombre total de bassins versants
<i>(1) écoulement total</i>	65%	35%	20
<i>(2) écoulement en crue</i>	60%	40%	10
<i>(3) déficit d'écoulement en étiage</i>	41%	59%	17
<i>(4) écoulement de base</i>	44%	56%	16

Le Tableau 11.2 montre qu'il n'existe pas de direction très claire dans le cas des bassins non stationnaires. On peut tout au plus faire remarquer que, dans chacun des cas, la direction majoritaire est celle qui correspond à l'effet attendu d'une augmentation du couvert forestier, selon la littérature et selon nos observations sur le bassin versant reboisé de Coshocton (chapitre 10).

11.2 Certains bassins présentent-ils des non-stationnarités trop complexes pour être identifiées par nos tests ?

Après avoir appliqué de façon « systématique » les tests à nos bassins, nous sommes retournés aux matrices de simulations croisées (exprimées en '+' et en '-'), pour chercher visuellement s'il était possible d'identifier des situations pour lesquelles le test n'aurait pas pu fonctionner, alors même qu'il y aurait une non-stationnarité décelable visuellement. Nous proposons dans un premier temps une typologie de ces situations, puis nous faisons l'inventaire des situations correspondantes.

11.2.1 Typologie des non-stationnarités « complexes »

Les situations que nous avons pu identifier par examen visuel des tableaux de simulations croisées sont de trois types : stabilité suivie d'une tendance ; deux tendances opposées qui se neutralisent ; un décrochement brusque.

Nous présentons ci-dessous des exemples correspondant à chacun de ces trois cas.

▪ *Stabilité suivie d'une tendance*

Nous avons vu dans le cas du bassin versant reboisé de Coshocton que nos tests ne pouvaient détecter une période de non-stationnarité, dès lors que celle-ci était suivie d'une période de stationnarité suffisamment longue. On peut suspecter un tel cas de figure pour le bassin versant A par exemple, dans le cas de l'écoulement en étiage (Figure 11.1).

<table border="0"> <tr> <td>54-</td><td>58-</td><td>62-</td><td>66-</td><td>70-</td><td>74-</td><td>78-</td><td>82-</td><td>86-</td><td>90-</td> </tr> <tr> <td>- 58 -</td><td>- 62 -</td><td>- 66 -</td><td>- 70 -</td><td>- 74 -</td><td>- 78 -</td><td>- 82 -</td><td>- 86 -</td><td>- 90 -</td><td>- 96 -</td> </tr> <tr> <td>o</td><td>+</td><td>+</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>+</td> </tr> <tr> <td></td><td>o</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td> </tr> <tr> <td></td><td></td><td>o</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td> </tr> <tr> <td></td><td></td><td></td><td>o</td><td>-</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td> </tr> <tr> <td></td><td></td><td></td><td></td><td>o</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td> </tr> <tr> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>o</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td> </tr> <tr> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>o</td><td>-</td><td>+</td><td>+</td> </tr> <tr> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>o</td><td>+</td><td>+</td> </tr> <tr> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>o</td><td>+</td> </tr> <tr> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>o</td> </tr> </table> <p>risque α' : 50 % risque α'' : 21 %</p>	54-	58-	62-	66-	70-	74-	78-	82-	86-	90-	- 58 -	- 62 -	- 66 -	- 70 -	- 74 -	- 78 -	- 82 -	- 86 -	- 90 -	- 96 -	o	+	+	-	-	-	-	-	-	+		o	-	-	-	-	-	-	-	-			o	-	-	-	-	-	-	-				o	-	+	+	+	+	+					o	+	+	+	+	+						o	+	+	+	+							o	-	+	+								o	+	+									o	+										o	<table border="0"> <tr> <td>54-</td><td>58-</td><td>62-</td><td>66-</td> </tr> <tr> <td>- 58 -</td><td>- 62 -</td><td>- 66 -</td><td>- 70 -</td> </tr> <tr> <td>o</td><td>+</td><td>+</td><td>-</td> </tr> <tr> <td></td><td>o</td><td>-</td><td>-</td> </tr> <tr> <td></td><td></td><td>o</td><td>-</td> </tr> <tr> <td></td><td></td><td></td><td>o</td> </tr> </table> <p>risque α' : 25 % risque α'' : 33 %</p>	54-	58-	62-	66-	- 58 -	- 62 -	- 66 -	- 70 -	o	+	+	-		o	-	-			o	-				o
54-	58-	62-	66-	70-	74-	78-	82-	86-	90-																																																																																																																																								
- 58 -	- 62 -	- 66 -	- 70 -	- 74 -	- 78 -	- 82 -	- 86 -	- 90 -	- 96 -																																																																																																																																								
o	+	+	-	-	-	-	-	-	+																																																																																																																																								
	o	-	-	-	-	-	-	-	-																																																																																																																																								
		o	-	-	-	-	-	-	-																																																																																																																																								
			o	-	+	+	+	+	+																																																																																																																																								
				o	+	+	+	+	+																																																																																																																																								
					o	+	+	+	+																																																																																																																																								
						o	-	+	+																																																																																																																																								
							o	+	+																																																																																																																																								
								o	+																																																																																																																																								
									o																																																																																																																																								
54-	58-	62-	66-																																																																																																																																														
- 58 -	- 62 -	- 66 -	- 70 -																																																																																																																																														
o	+	+	-																																																																																																																																														
	o	-	-																																																																																																																																														
		o	-																																																																																																																																														
			o																																																																																																																																														
	<table border="0"> <tr> <td>70-</td><td>74-</td><td>78-</td><td>82-</td><td>86-</td><td>90-</td> </tr> <tr> <td>- 74 -</td><td>- 78 -</td><td>- 82 -</td><td>- 86 -</td><td>- 90 -</td><td>- 96 -</td> </tr> <tr> <td>o</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td> </tr> <tr> <td></td><td>o</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td> </tr> <tr> <td></td><td></td><td>o</td><td>-</td><td>+</td><td>+</td> </tr> <tr> <td></td><td></td><td></td><td>o</td><td>+</td><td>+</td> </tr> <tr> <td></td><td></td><td></td><td></td><td>o</td><td>+</td> </tr> <tr> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>o</td> </tr> </table> <p>risque α' : 0.05 % risque α'' : 0.17 %</p>	70-	74-	78-	82-	86-	90-	- 74 -	- 78 -	- 82 -	- 86 -	- 90 -	- 96 -	o	+	+	+	+	+		o	+	+	+	+			o	-	+	+				o	+	+					o	+						o																																																																																																
70-	74-	78-	82-	86-	90-																																																																																																																																												
- 74 -	- 78 -	- 82 -	- 86 -	- 90 -	- 96 -																																																																																																																																												
o	+	+	+	+	+																																																																																																																																												
	o	+	+	+	+																																																																																																																																												
		o	-	+	+																																																																																																																																												
			o	+	+																																																																																																																																												
				o	+																																																																																																																																												
					o																																																																																																																																												

Figure 11.1 : tableau de simulations croisées où une période de stabilité est suivie d'une période de non-stationnarité (BV A, variable cible : écoulement en étiage)

Les *p-value* obtenues sur les deux sous-matrices sont sans équivoque : rien ne permet de conclure à une non-stationnarité sur la première période (jusqu'à 1970), alors qu'entre 1970 et 1996, la présomption d'existence d'une tendance est très forte.

Il faut noter cependant que l'identification de cas stables suivis d'une tendance est toujours très subjective (sauf dans le cas de très longues chroniques) car elle dépendra beaucoup du découpage sélectionné.

▪ *Deux tendances opposées qui se neutralisent*

Il est facile de comprendre que la succession de deux tendances opposées ne puisse être détectée par nos tests. Le test 1 par exemple, qui s'appuie sur le dénombrement des '+' et des '-' dans les matrices de simulations croisées, verra un nombre équilibré de chacun des signes, et ignorera le fait que les '+' et les '-' forment deux groupes distincts.

On peut suspecter un tel cas de figure pour le bassin versant P par exemple, dans le cas de l'écoulement total (Figure 11.2). Si l'on divise la période d'étude en deux, on observe clairement deux tendances opposées : sur la période 1956-1980, on observe une tendance à l'augmentation de l'écoulement, et sur la période 1976-1996, la

tendance est à la diminution. Seul un contrôle visuel permet de distinguer simplement ces deux cas de figure.

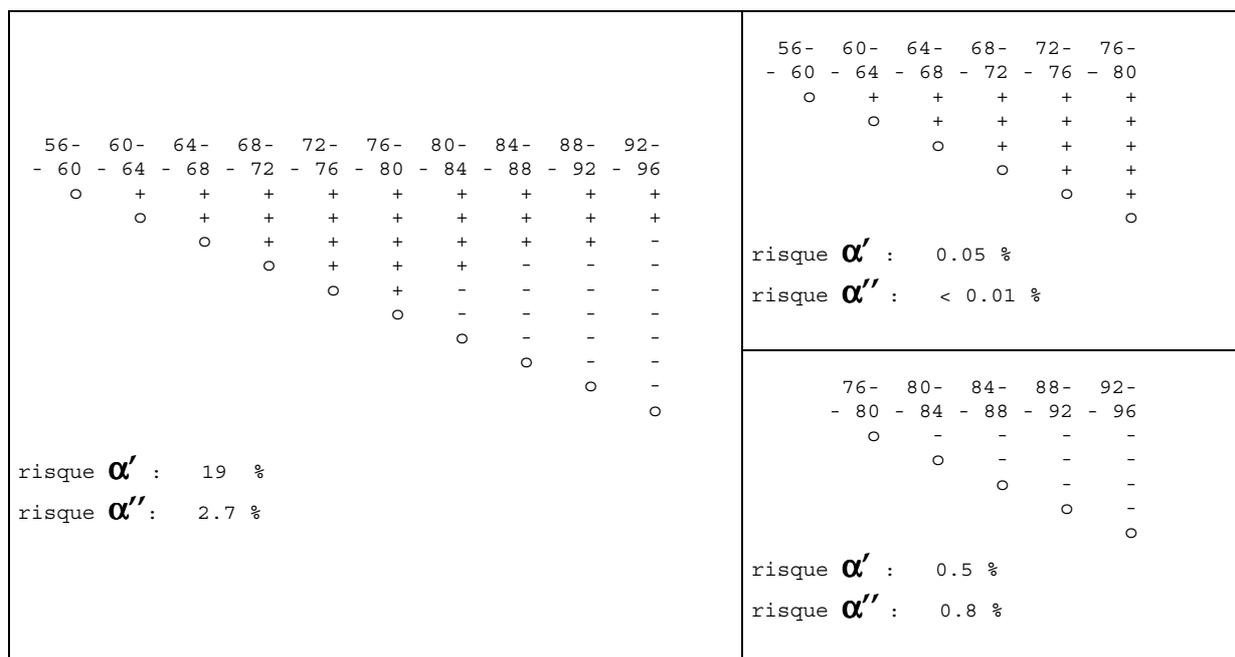


Figure 11.2: tableau de simulations croisées où co-existent deux tendances successives (BV P, variable cible : écoulement total)

■ **Un décrochement brusque**

Un décrochement brusque peut survenir entre deux périodes apparemment stationnaires, et sera très difficile à déceler au moyen des tests existants. On peut cependant le déceler visuellement en s'intéressant à la partie « en haut à droite » de la demi-matrice (en grisé Figure 11.3).

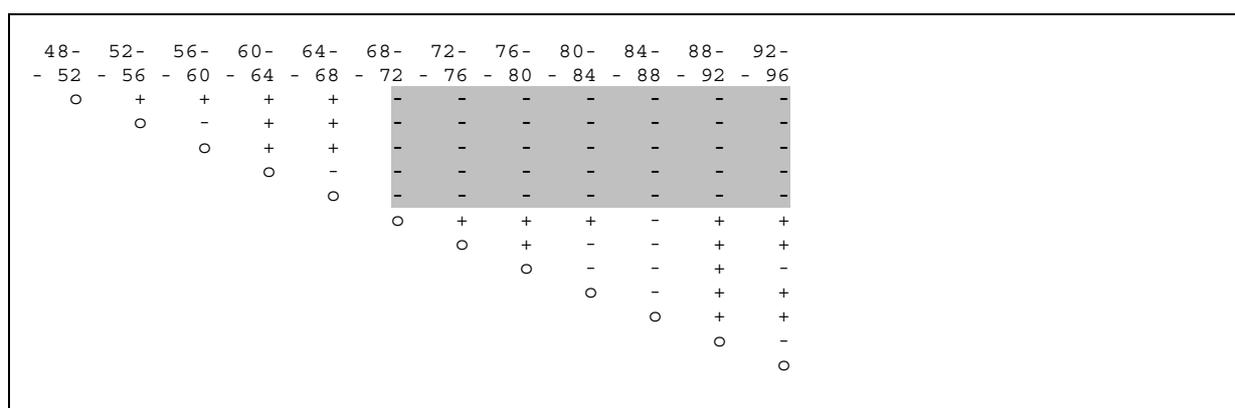


Figure 11.3: tableau de simulations croisées où on reconnaît un décrochement brusque (BV P, variable cible : écoulement en étiage)

La zone grisée s'interprète de la façon suivante : les modèles représentatifs du comportement du bassin sur les périodes postérieures à 1968-72 donnent, à pluie égale, des résultats systématiquement inférieurs à ceux des modèles des périodes

antérieures à 1964-68. Notons que sur les périodes 1948-68 et 1968-96, le bassin semble stationnaire. Ce type de changement est assez étonnant pour le bassin considéré, et pourrait plutôt correspondre à des problèmes d'hydrométrie (les écoulements en étiage étant d'ailleurs les plus sensibles à ce genre de problèmes).

11.2.2 Inventaire des situations complexes

Le Tableau 11.3 présente la liste des bassins versants et des variables hydrologiques pour lesquelles nous avons identifié visuellement une des tendances « complexes » discutées ci-dessus. Notons qu'étant donné le caractère très subjectif de l'identification de « cas stables suivis d'une tendance », nous ne présentons que les bassins entrant dans l'un des deux cas suivants : « tendances opposées qui se neutralisent » et « décrochement brusque ».

Tableau 11.3 : cas de tendances « complexes » (non-déTECTABLES par nos trois tests) recensés dans les 63 bassins versants du Massif central

BV	Tendances opposées qui se neutralisent				Décrochement brusque			
	variable hydrologique				variable hydrologique			
	Ec. Tot.	Ec. crue	Ec. ét.	Ec. base	Ec. Tot.	Ec. crue	Ec. ét.	Ec. base
27			x					
29					x			x
32	x	x						
41				x				
A			x					
B			x					
G							x	
I			x					
J						x		
K			x					
M							x	x
P	x							
S					x	x	x	

Il apparaît que les conclusions de la section 11.1 sont certainement assez conservatrices : les évolutions du comportement hydrologique observées dans le Massif central concernent une part importante des bassins versants étudiés.

11.3 Analyse de quelques cas particuliers d'évolution dans le Massif central

Il est utile et intéressant d'extraire de notre échantillon du Massif central quelques cas particuliers d'évolution, non liés à la forêt et susceptibles de faire évoluer la relation pluie-débit : le déplacement d'une station de jaugeage, une évolution du rural vers le périurbain.

- **Un cas de déplacement de la station de jaugeage : une légère surestimation de l'écoulement total ?**

Tableau 11.4 : interprétation des matrices de simulation croisées pour le bassin 38 (L'Homol à Echelette - 34.4 km² - puis l'Homol à Davaladou - 31.2 km² -, transfert réalisé en 1974)

1960-	64-	68-	76-	80-	1960-	64-	68-	76-	80-
- 64	- 68	- 73	- 80	- 86	- 64	- 68	- 73	- 80	- 86
○	-	-	+	+	○	+	+	+	+
	○	-	+	+		○	-	+	+
		○	+	+			○	+	+
			○	+				○	+
				○					○
$\alpha' : 11\%, \alpha'' : 6.1\%, \alpha''' : 16\%$					$\alpha' : 2.5\%, \alpha'' : 3.6\%, \alpha''' : 15\%$				
(1) : écoulement total					(2) : volume écoulé en crue				
1960-	64-	68-	76-	80-	1960-	64-	68-	76-	80-
- 64	- 68	- 73	- 80	- 86	- 64	- 68	- 73	- 80	- 86
○	+	+	+	-	○	-	-	-	+
	○	-	-	-		○	-	+	+
		○	-	-			○	-	+
			○	-				○	+
				○					○
$\alpha' : 11\%, \alpha'' : 14.2\%, \alpha''' : 2.5\%$					$\alpha' : 25\%, \alpha'' : 45\%, \alpha''' : 49\%$				
(3) : déficit d'écoulement en étiage					(4) : indice d'écoulement de base				

Le bassin versant de l'Homol présente la particularité d'avoir connu un déplacement de sa station de jaugeage en 1974, suite à la mise en eau du barrage de Sénéchas. Nous avons voulu vérifier ici que ce changement de site (et donc de courbe de tarage), n'est pas visible dans le tableau des simulations croisées : c'est apparemment le cas, quoiqu'il semble y avoir une légère tendance à la surestimation des écoulements après déplacement de la station de jaugeage. Mais la chronique disponible est trop courte pour conclure, et l'amplitude du changement reste limitée (voir tableau normé en annexe).

- **Deux cas de bassins versants périurbains : un effet contraire à celui que l'on attendait ?**

Bassin versant de l'Aurence

Le bassin versant de l'Aurence à Moulin Pinard est situé à proximité de Limoges. Son extrémité aval a connu une forte urbanisation au cours des années 1970, avec notamment l'installation d'un centre commercial et d'une zone artisanale.

Tableau 11.5 : interprétation des matrices de simulation croisées pour le bassin 12 (l'Aurence à Moulin Pinard)

1965-	69-	73-	77-	81-	85-	89-	1965-	69-	73-	77-	81-	85-	89-
- 69	- 73	- 77	- 81	- 85	- 89	- 95	- 69	- 73	- 77	- 81	- 85	- 89	- 95
o	+	-	-	-	-	+	o	+	-	-	-	-	-
	o	-	-	-	-	-		o	-	-	-	-	-
		o	-	-	+	+			o	-	+	+	-
			o	+	+	+				o	+	+	+
				o	+	+					o	+	-
					o	+						o	-
						o							o
$\alpha' : 35\%, \alpha'' : 36\%, \alpha''' : 35\%$							$\alpha' : 15\%, \alpha'' : 36\%, \alpha''' : 25\%$						
(1) : écoulement total							(2) : volume écoulé en crue						
1965-	69-	73-	77-	81-	85-	89-	1965-	69-	73-	77-	81-	85-	89-
- 69	- 73	- 77	- 81	- 85	- 89	- 95	- 69	- 73	- 77	- 81	- 85	- 89	- 95
o	-	-	+	+	+	-	o	-	-	+	+	-	-
	o	+	+	+	+	-		o	+	+	+	+	+
		o	+	+	+	-			o	+	+	-	+
			o	+	+	-				o	-	-	-
				o	-	-					o	-	-
					o	-						o	+
						o							o
$\alpha' : 25\%, \alpha'' : 44\%, \alpha''' : 42\%$							$\alpha' : 50\%, \alpha'' : 43\%, \alpha''' : 49\%$						
(3) : déficit d'écoulement en étiage							(4) : indice d'écoulement de base						

Les résultats de l'application de nos trois tests sont présentés au Tableau 11.5. Il est intéressant de constater que, quelle que soit la variable hydrologique analysée, on ne détecte aucun changement sur l'ensemble de la période d'étude. Tout au plus pourrait-on suspecter une tendance à l'augmentation de l'écoulement total après 1977.

Bassin versant de l'Yzeron

Le bassin versant de l'Yzeron se trouve en bordure de l'agglomération lyonnaise, et a connu une urbanisation de sa partie aval au cours des trente dernières années (nous n'avons pas traité les données de l'IFN pour ce bassin et nous ne pouvons donc rien dire de l'évolution de son couvert forestier, qui couvre cependant de faibles superficies).

Tableau 11.6 : interprétation des matrices de simulation croisées pour le bassin 34 (l'Yzeron à Craponne)

1969-	73-	77-	81-	85-	89-	93-	1969-	73-	77-	81-	85-	89-	93-
- 73	- 77	- 81	- 85	- 89	- 93	- 96	- 73	- 77	- 81	- 85	- 89	- 93	- 96
o	+	-	-	-	-	-	o	+	-	-	-	-	-
	o	-	-	-	-	-		o	-	-	-	-	-
		o	-	-	-	-			o	-	-	-	-
			o	-	-	-				o	+	+	-
				o	+	-					o	-	-
					o	-						o	+
						o							o
$\alpha' : 0.5\%, \alpha'' : 0.7\%, \alpha''' : 1.1\%$							$\alpha' : 1.1\%, \alpha'' : 0.9\%, \alpha''' : 0.7\%$						
(1) : écoulement total							(2) : volume écoulé en crue						
1969-	73-	77-	81-	85-	89-	93-	1969-	73-	77-	81-	85-	89-	93-
- 73	- 77	- 81	- 85	- 89	- 93	- 96	- 73	- 77	- 81	- 85	- 89	- 93	- 96
o	-	+	+	+	+	+	o	+	+	+	-	-	+
	o	+	+	+	+	+		o	-	-	-	-	+
		o	+	+	+	+			o	+	-	-	+
			o	+	+	+				o	-	-	+
				o	-	-					o	+	+
					o	+						o	+
						o							o
$\alpha' : 1.1\%, \alpha'' : 2.3\%, \alpha''' : 7.2\%$							$\alpha' : 50\%, \alpha'' : 47\%, \alpha''' : 47\%$						
(3) : déficit d'écoulement en étiage							(4) : indice d'écoulement de base						

Les résultats de l'application de nos trois tests sont présentés au Tableau 11.6. On y voit une forte non-stationnarité pour l'écoulement total et l'écoulement en crue, et une non-stationnarité possible pour l'écoulement en étiage. **Il est intéressant de noter que le sens de ces changements n'est pas celui que l'on attend classiquement d'une urbanisation : l'écoulement total et l'écoulement en crue diminuent au lieu d'augmenter.** Une étude plus approfondie du bassin serait nécessaire pour comprendre pourquoi l'évolution va dans ce sens¹.

11.4 Conclusion du Chapitre 11

Au chapitre 11, nous avons pu appliquer trois tests statistiques de détection de tendances à l'ensemble de nos 63 bassins versants du Massif central, et nous y avons détecté une forte proportion de bassins non-stationnaires.

Compte tenu des fortes évolutions constatées en ce qui concerne le couvert forestier de ces bassins versants, nous nous proposons au chapitre suivant de tester l'hypothèse d'un lien entre ces deux évolutions.

¹ Il pourrait s'agir par exemple de diversion d'une partie de l'écoulement vers l'extérieur du bassin versant... car il est peu probable que l'imperméabilisation des sols a un effet réducteur sur les crues !

12 PEUT-ON LIER LES TENDANCES HYDROLOGIQUES ET FORESTIERES DANS LE MASSIF CENTRAL ?

Dans ce chapitre, nous présentons les approches utilisées pour mettre en évidence un possible lien entre l'évolution du couvert forestier et l'évolution du comportement hydrologique d'un bassin versant. Les résultats du chapitre 11 ont en effet montré qu'il existait, au sein de notre zone d'étude, une assez forte proportion de bassins dont la relation pluie-débit était non-stationnaire. Compte tenu des fortes évolutions constatées en ce qui concerne le couvert forestier de ces bassins versants, il a semblé important d'investiguer un possible lien entre ces deux évolutions.

Pour définir le comportement hydrologique, nous avons retenu ici les quatre variables hydrologiques présentées et utilisées en partie V (voir Figure 9.1) : l'écoulement total, l'écoulement en crue, le déficit d'écoulement en étiage, l'indice d'écoulement de base.

Ce chapitre est organisé de la façon suivante :

- Dans un premier temps (section 12.1), nous poursuivons sur la voie tracée dans les chapitres 9, 10 et 11, et nous comparons les tendances identifiées dans les tableaux de simulations croisées aux tendances observables dans les données forestières¹.
- Ensuite (section 12.2), nous proposons une approche alternative permettant d'exploiter simultanément la dynamique interne de chaque bassin et la dynamique régionale.
- La dernière partie (section 12.3) est consacrée à une discussion du rôle « modérateur » du couvert forestier.

12.1 Y a-t-il un lien entre le caractère non-stationnaire d'un bassin et l'évolution de son couvert forestier ?

12.1.1 *Utilisation des tableaux de simulations croisées pour définir un indice normé d'évolution du comportement hydrologique permettant la comparaison de l'amplitude des changements entre bassins*

Dans cette section, nous cherchons à établir un lien entre les résultats des tests effectués sur les tableaux de simulations croisées et l'évolution du couvert forestier. Les tests sur les tableaux de simulations croisées nous fournissent une estimation du risque de première espèce, c'est-à-dire qu'ils nous informent sur le risque pris en rejetant l'hypothèse de stationnarité H_0 . S'ils nous permettent de quantifier la crédibilité d'un changement hydrologique, ils ne permettent pas de mesurer directement son amplitude, et fournissent des résultats qui dépendent de la taille des tableaux de simulations croisées.

¹ Rappelons que les données forestières ne sont pas disponibles en continu (comme les données de pluie et de débit), mais uniquement à trois dates (les trois cycles d'inventaire de l'IFN), et seulement pour un peu plus de la moitié de notre échantillon.

Partie VI : Couvert forestier et non-stationnarité des bassins versants

- Nous avons donc voulu dans cette section proposer tout d'abord un indice « normé » (c'est à dire ne dépendant ni de la taille des tableaux, ni du module de l'écoulement), pour mesurer l'évolution du comportement hydrologique.
- Cet indice peut être ensuite comparé à un indice très simple d'évolution du couvert forestier : la pente observée sur la surface terrière moyenne du bassin versant (calculée sur les trois périodes d'inventaire). Pour rendre les deux indices comparables, nous avons limité, pour les matrices de simulations croisées, les périodes de calage à la durée concomitante aux trois inventaires.

L'indice hydrologique reprend la statistique SDD dont nous construisons la distribution dans le test n°2 (voir section 9.4.2), la différence étant que l'on divise le résultat de chaque ligne par la valeur de la diagonale (pour travailler en écarts relatifs) et que l'on divise la somme totale par le nombre d'éléments de la somme (pour normer le test et le rendre indépendant de la taille de la matrice).

Nous détaillons ci-dessous la construction d'un indice normé d'évolution du comportement hydrologique, en reprenant l'exemple de la section 9.4.2 :

2113	1613	1749	1740	→	(-500 -364 -373)/2113=	-0.585	
	1244	1355	1360	→	(111 +116)/1244=	0.182	
		1442	1438	→	-4/1442=	-0.003	
			1254				
Matrice 1				Moyenne des résidus normés			-0.406/6 = -0.068

Si l'on note x_{ij} les éléments de la matrice, on peut également exprimer l'indice comme suit :

$$\text{Indice normé d'évolution du comportement hydrologique} = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \frac{(x_{ij} - x_{ii})}{x_{ii}} \quad \text{Eq. 12.1}$$

De cette façon, en combinant la pente d'évolution forestière et l'indice normé d'évolution du comportement hydrologique, on obtient des couples (*évolution forestière, évolution hydrologique*) que l'on peut placer sur un graphe afin de faire apparaître une possible corrélation. Cette analyse graphique est réalisée en section suivante.

12.1.2 Analyse graphique du lien entre évolution hydrologique et évolution forestière

Nous présentons ici les graphes tracés pour chaque variable hydrologique étudiée :

- Indice normé d'évolution du comportement hydrologique = f (surface terrière moyenne sur les trois inventaires)
- Indice normé d'évolution du comportement hydrologique = f (pente d'évolution de la surface terrière)

▪ Ecoulement total

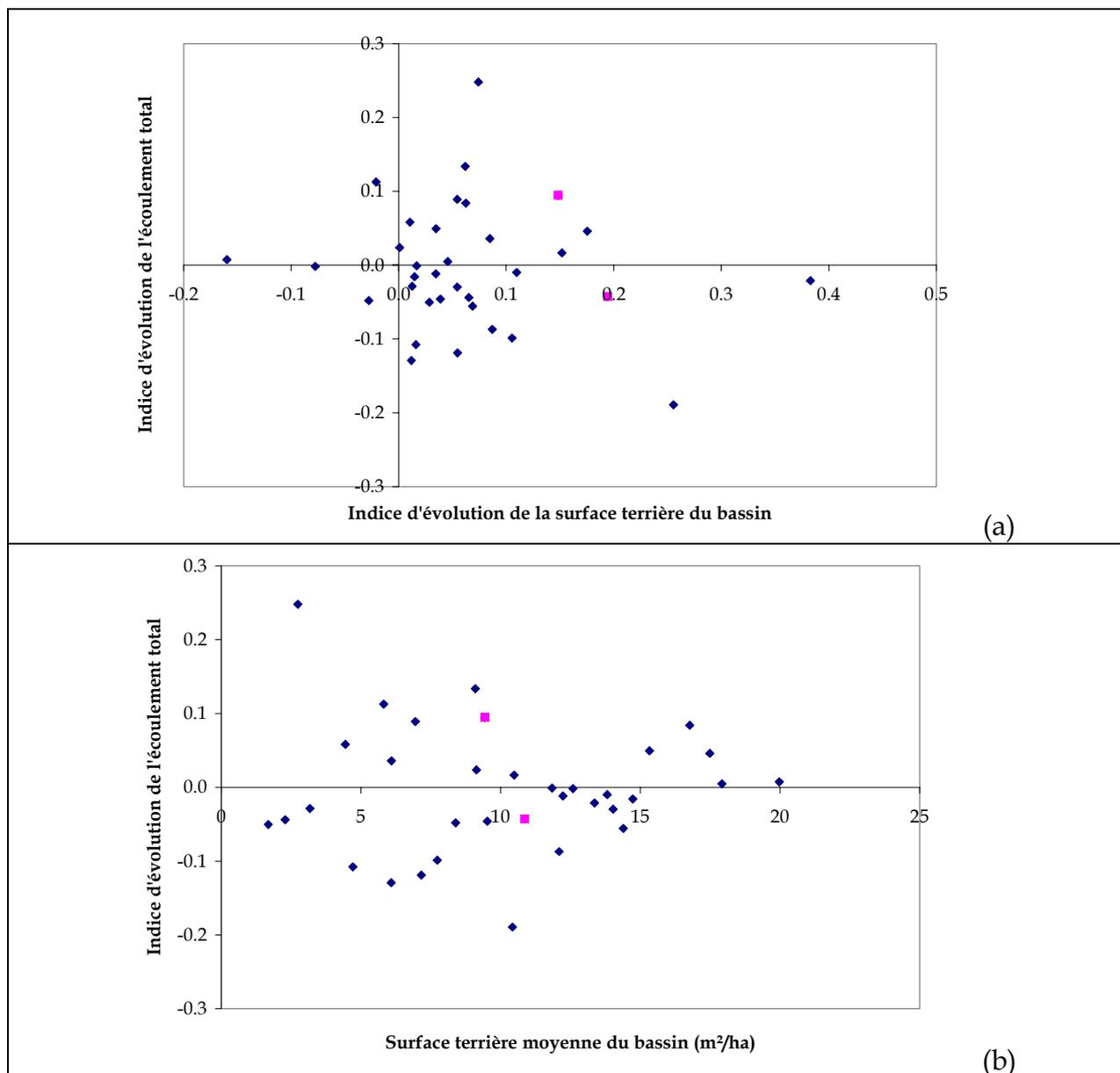


Figure 12.1 : graphiques explorant le lien entre l'évolution de l'écoulement total et (a) l'évolution de la surface terrière, (b) la surface terrière du bassin (valeur moyenne des trois cycles) pour 34 bassins du massif Central (les carrés roses correspondent aux tendances « complexes » recensées au Tableau 11.3)

S'il existait une relation linéaire entre les deux paramètres d'évolution, celle-ci se traduirait par un nuage oblique. Mais la Figure 12.1 (a) ne laisse supposer aucune relation. On note cependant en Figure 12.1 (b) qu'il semble y avoir une relation inverse entre la variabilité des comportements hydrologiques et la surface terrière du bassin : le nuage de points s'affine progressivement le long de l'axe des x, ce qui pourrait être interprété comme un rôle atténuateur de la forêt vis à vis de perturbations dont l'origine reste à éclaircir.

▪ Ecoulement en crue

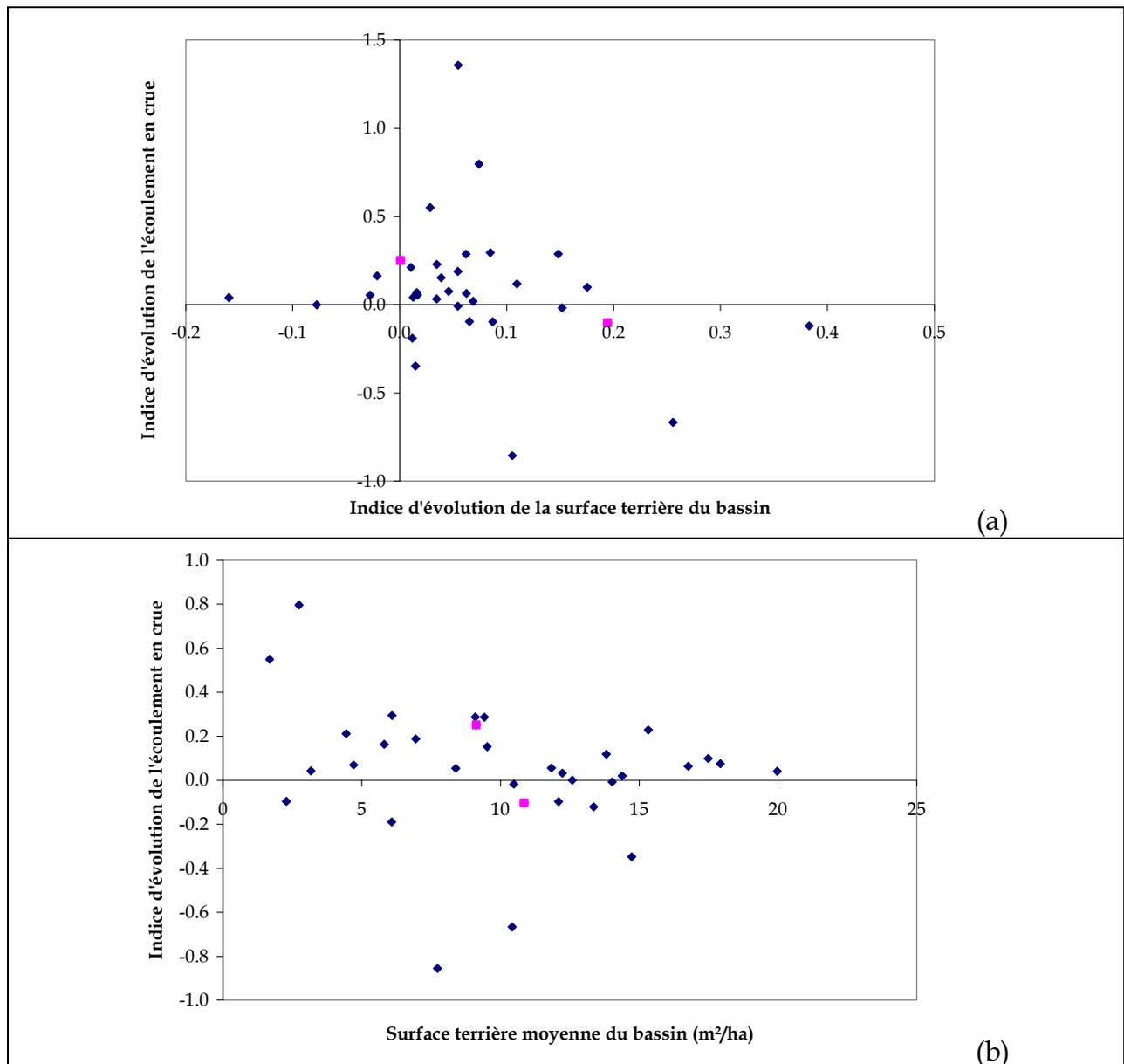


Figure 12.2 : graphiques explorant le lien entre l'indice normé d'évolution de l'écoulement en crue et (a) l'indice d'évolution de la surface terrière, (b) la surface terrière du bassin (valeur moyenne des trois cycles) pour 34 bassins du massif Central (les carrés roses correspondent aux tendances « complexes » recensées au Tableau 11.3)

La Figure 12.2 est très similaire à la Figure 12.1, et on peut donc formuler les mêmes conclusions pour l'écoulement en crue : aucun lien n'apparaît entre évolution du comportement en crue et évolution forestière. On retrouve cependant la variabilité des comportements apparemment réduite pour les bassins les plus densément boisés.

▪ Déficit d'écoulement en étiage

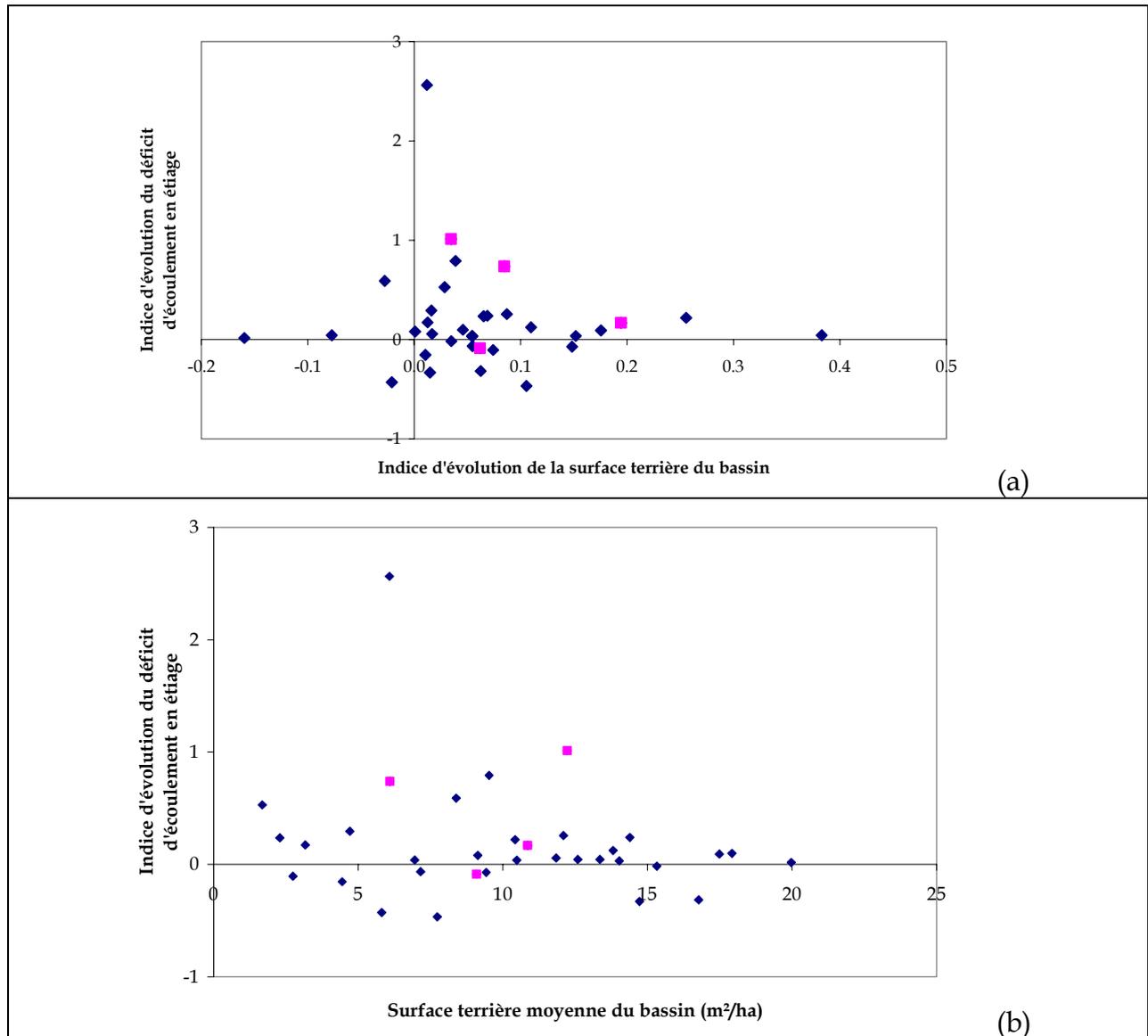


Figure 12.3 : graphiques explorant le lien entre l'indice normé d'évolution du déficit d'écoulement en étiage et (a) l'indice d'évolution de la surface terrière, (b) la surface terrière du bassin (valeur moyenne des trois cycles) pour 34 bassins du massif Central (les carrés roses correspondent aux tendances « complexes » recensées au Tableau 11.3)

La Figure 12.3 (a) ne montre à nouveau aucun lien entre surface terrière et écoulement en étiage. Quant à Figure 12.3 (b) on a l'impression de retrouver une variabilité des comportements réduite pour les bassins les plus forestiers, mais l'échantillon est trop petit pour conclure.

▪ Indice d'écoulement de base.

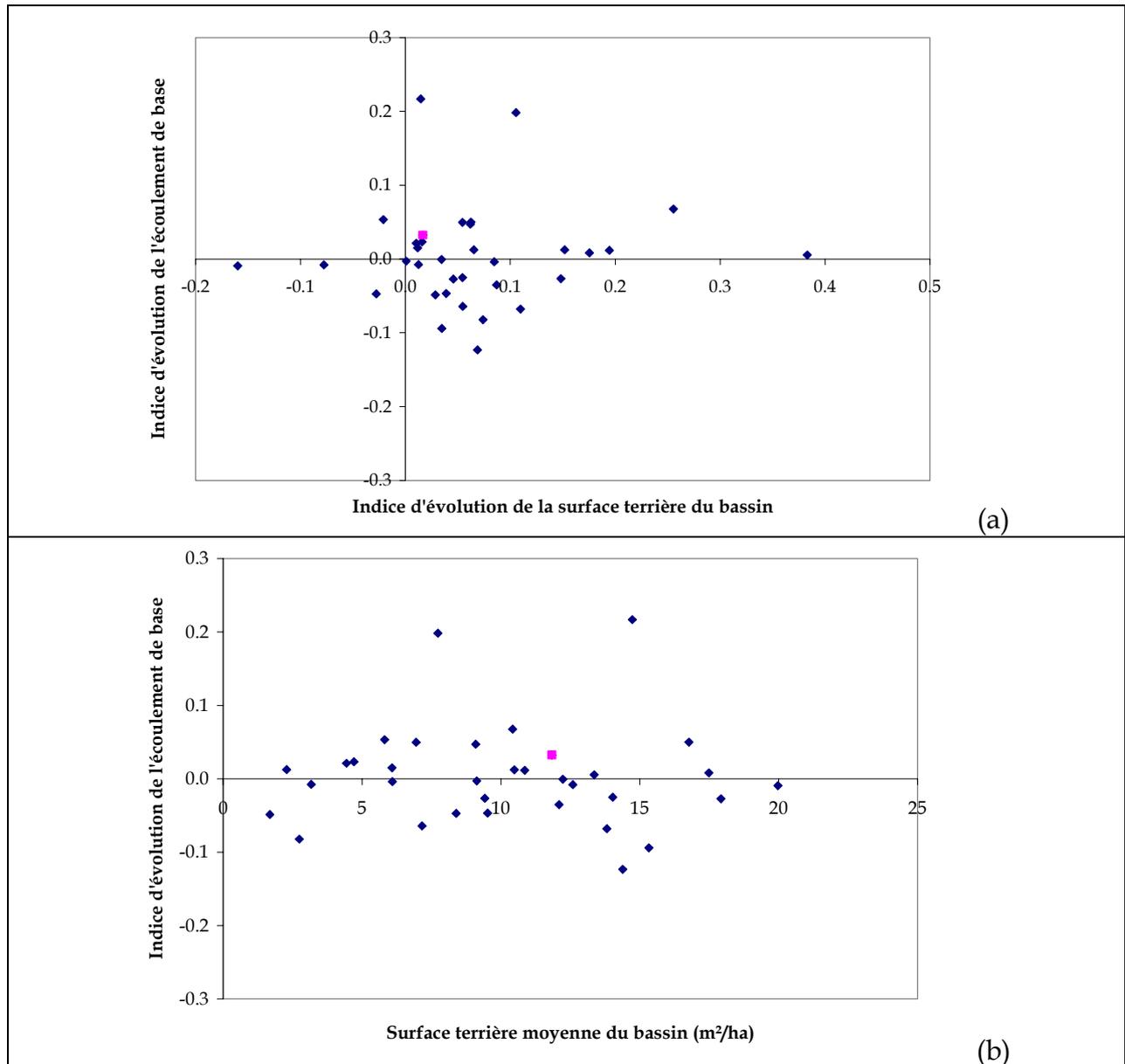


Figure 12.4: graphiques explorant le lien entre l'indice normé d'évolution de l'écoulement de base et (a) l'indice d'évolution de la surface terrière, (b) la surface terrière du bassin (valeur moyenne des trois cycles) pour 34 bassins du massif Central (les carrés roses correspondent aux tendances « complexes » recensées au Tableau 11.3)

La Figure 12.4 (a et b) ne laisse apparaître aucune relation entre l'évolution du comportement de l'écoulement de base et l'évolution de la surface terrière ou la surface terrière moyenne du bassin.

12.1.3 Conclusion sur la méthode employée pour comparer les matrices de simulations croisées et l'évolution forestière

Une méthode graphique ne nous a pas permis d'identifier de lien entre évolution hydrologique et évolution forestière, et cela, quelle que soit la variable hydrologique étudiée. La méthode que nous avons utilisée présente un certain nombre de limites notamment en ce qui concerne l'indice d'évolution du couvert forestier, qui est très mal estimé en raison du faible nombre de points.

Un lien semble cependant exister, pour les deux premières variables hydrologiques, entre la variabilité des comportements hydrologiques et la surface terrière moyenne de chaque bassin : plus le bassin est forestier (en moyenne sur les trois cycles), moins son comportement hydrologique semble variable. Dans ce cas, on pourrait suggérer que la forêt atténue des variations dont l'origine reste inconnue.

Pour approfondir cette question, nous utilisons dans la section suivante une approche différente pour étudier le lien de causalité entre évolution forestière et évolution hydrologique.

12.2 Une approche alternative permettant d'exploiter les couples (descripteurs hydrologiques, descripteurs forestiers)

12.2.1 Principe de la méthode

Dans cette section, nous nous intéressons à une approche permettant d'exploiter au mieux la richesse de notre base de données, et notamment, de façon plus explicite que précédemment, les données d'inventaire forestier, disponibles à trois périodes successives. Pour cela, nous avons cherché à calculer pour chaque période d'inventaire et chaque bassin versant une grandeur caractéristique du comportement hydrologique du bassin à cet instant. Et pour rendre comparable toutes ces valeurs (à la fois entre inventaires et entre bassins), nous avons choisi d'utiliser la même chronique pluviométrique en entrée, quelle que soit la période, et quel que soit le bassin. On se propose d'appeler la valeur d'écoulement ainsi calculée *Réponse Hydrologique Potentielle* (RHP), pour suivre Schreider et al. (2002) qui utilisent dans leur article l'expression *Potential Streamflow Response*.

Pour chacune des variables hydrologiques considérées, chaque bassin est alors caractérisé par trois couples (écoulement, couvert forestier) successifs (Figure 12.5).

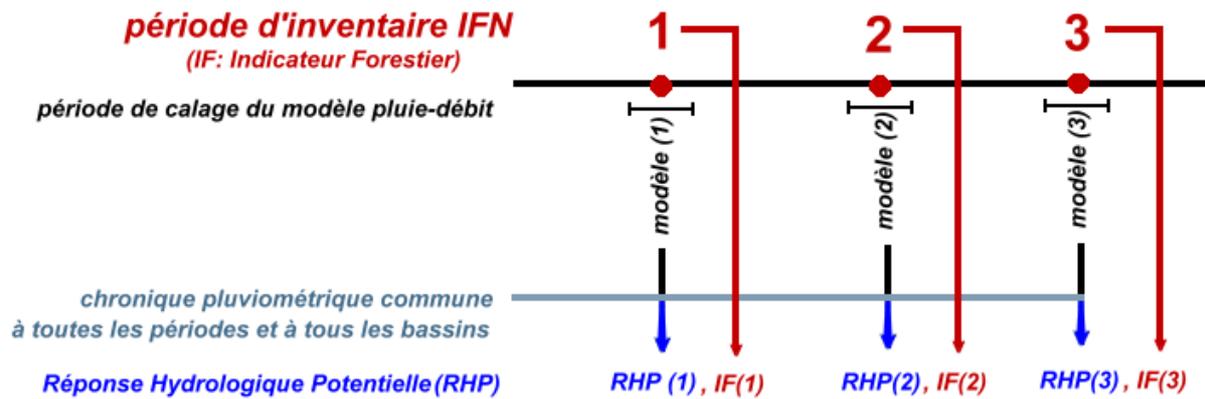


Figure 12.5 : méthode utilisée pour mettre en relation le couvert forestier et le comportement hydrologique (RHP) du bassin versant

Avant de mettre en œuvre cette méthode, décrivons ses principales caractéristiques :

- **Le modèle pluie-débit caractéristique d'une période est optimisé en utilisant cinq années de données** (la période de calage est centrée sur la date d'inventaire forestier)
- **La Réponse Hydrologique Potentielle (RHP) est calculée à partir de la même chronique de pluie quel que soit le bassin versant considéré.**

En procédant de la sorte, on a voulu exploiter les potentialités de simulation des modèles pluie-débit et permettre une comparaison immédiate des valeurs de RHP, à la fois entre les périodes et entre les bassins. Ceci a cependant impliqué d'homogénéiser la définition de l'écoulement en crue (au-dessus d'un seuil) et de l'écoulement en étiage (au-dessous d'un seuil). Pour permettre les comparaisons, nous avons utilisé la même référence pour tous les bassins.

- **On utilise un indicateur global pour quantifier l'évolution du couvert forestier.**

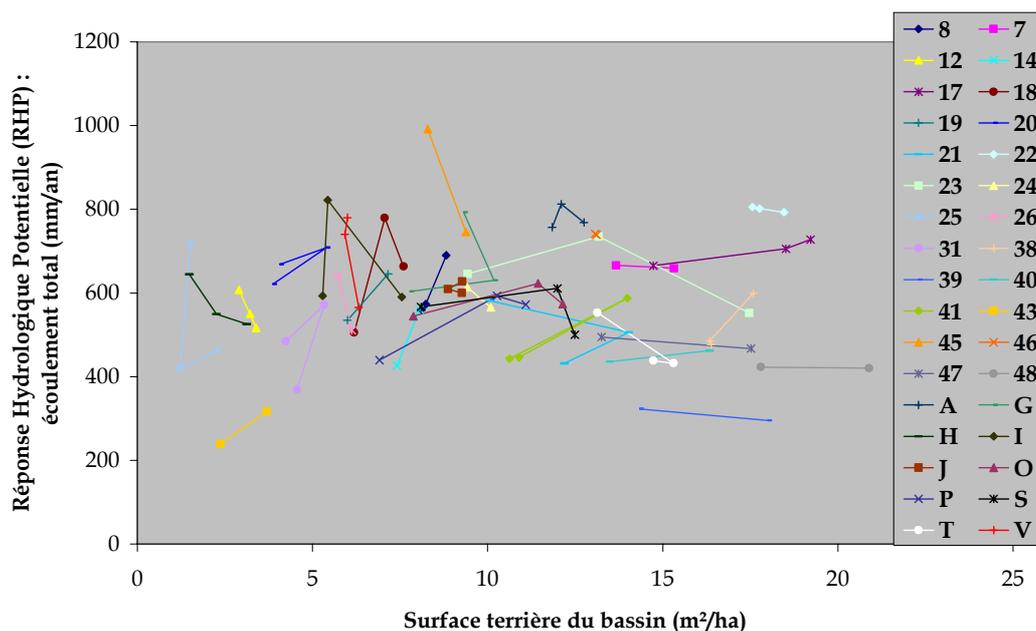
On utilise dans les graphiques suivants la surface terrière moyenne du bassin. Cet devrait être a priori plus informatif pour l'hydrologie, il résulte de la fusion de données de surfaces (mesurées sur le bassin), avec des données régionales.

Nous procédons à un examen graphique des données (section 12.2.2).

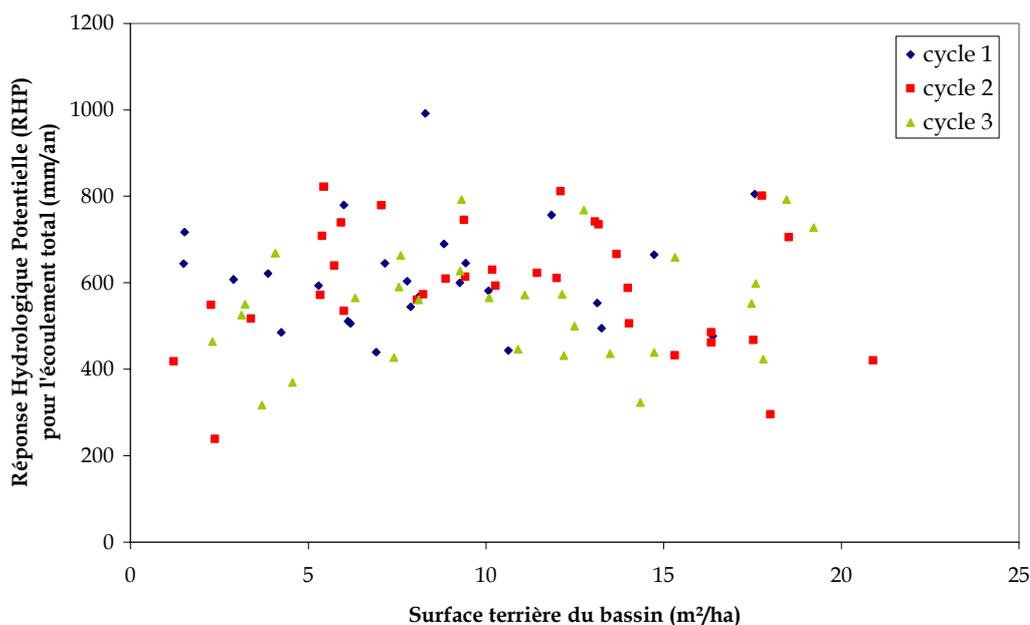
12.2.2 Examen graphique du lien entre la Réponse Hydrologique Potentielle (RHP) et le couvert forestier

Dans les graphiques ci-dessous, nous avons présenté pour chaque variable hydrologique la relation RHP – couvert forestier de deux façon différentes : (a) en faisant apparaître l'évolution de chaque bassin et (b) en faisant apparaître l'évolution de chaque cycle.

▪ **Écoulement total**



(a)



(b)

Figure 12.6 : corrélation existante entre l'évolution de l'écoulement total et l'évolution du couvert forestier pour 34 bassins versants du Massif central

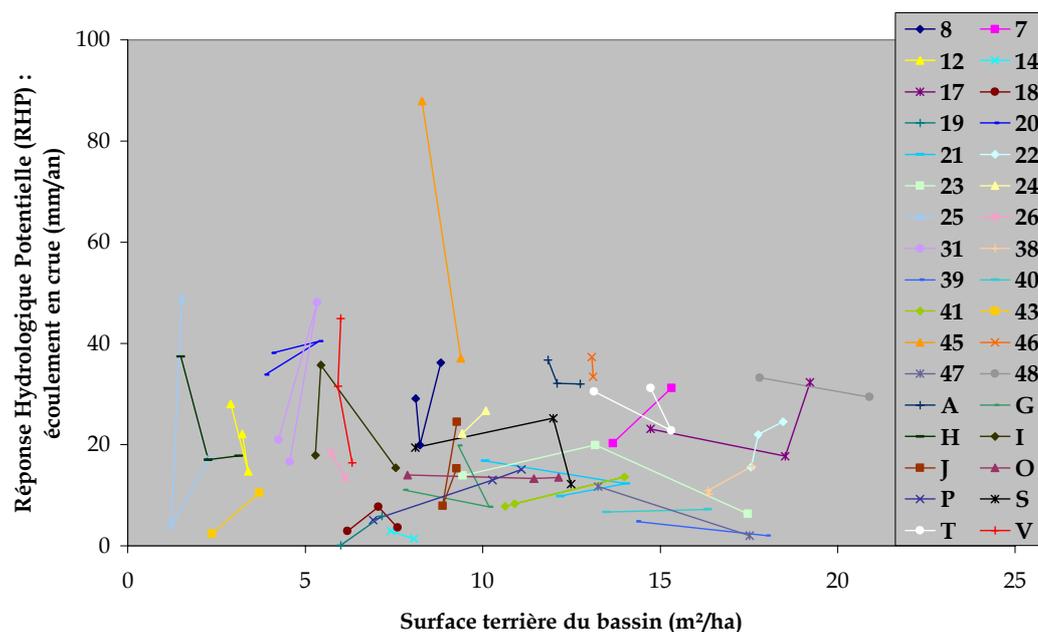
La Figure 12.6-a appelle plusieurs commentaires :

- D'une part, il n'existe aucune direction dominante dans l'évolution de la RHP en fonction de la surface terrière : s'il y avait un lien entre ces deux variables, celui-ci devrait s'accompagner d'un certain parallélisme des droites pour chaque bassin (ce qui n'est pas le cas) .

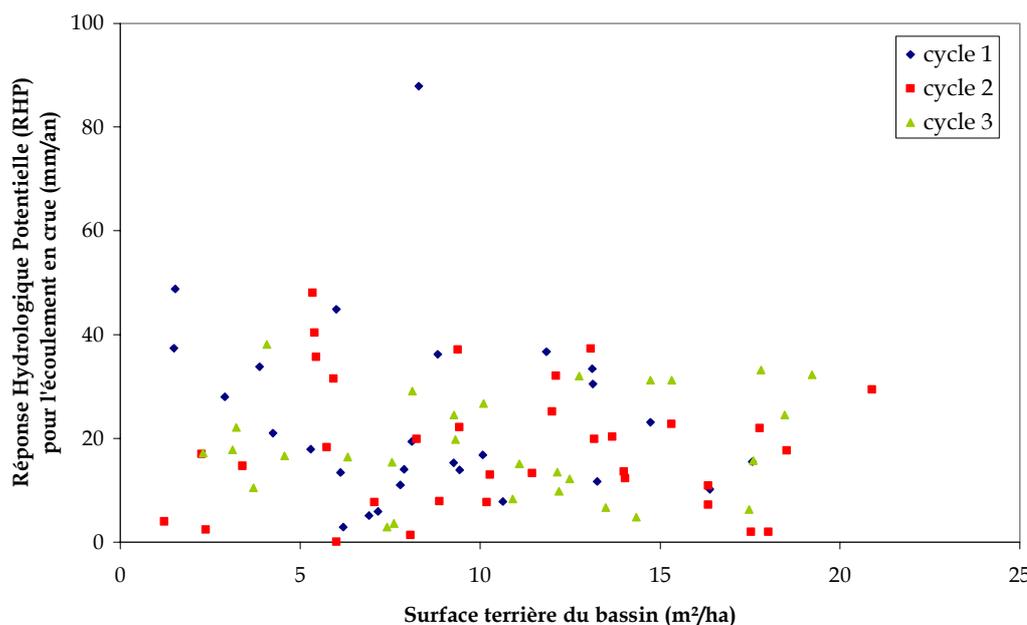
- D'autre part, on identifie facilement deux zones sur ce graphique :
 - une zone très chahutée, correspondante aux faibles valeurs de surface terrière (< 10-12 m²/ha), où la réponse hydrologique varie assez fortement, avec ou sans variation de surface terrière ;
 - une zone d'un peu plus grande stabilité hydrologique (au-delà de 12 m²/ha), correspondante aux fortes valeurs de surface terrière.

On retrouve ici une relation similaire à celle décrite en section précédente : les bassins les plus stables (du point de vue de l'écoulement total) sont les plus forestiers.

▪ Ecoulement en crue



(a)



(b)

Figure 12.7: corrélation existante entre l'évolution de l'écoulement en crue et l'évolution du couvert forestier pour 34 bassins versants du Massif central

Pour l'écoulement en crue, il n'apparaît pas non plus de corrélation marquée entre les changements de comportement hydrologique et l'évolution du couvert forestier. On continue cependant à observer en Figure 12.7-a une différence assez nette entre la variabilité des réponses hydrologiques des bassins peu forestiers (surface terrière moyenne < 10-12 m²/ha) et les bassins plus forestiers.

▪ Déficit d'écoulement en étiage

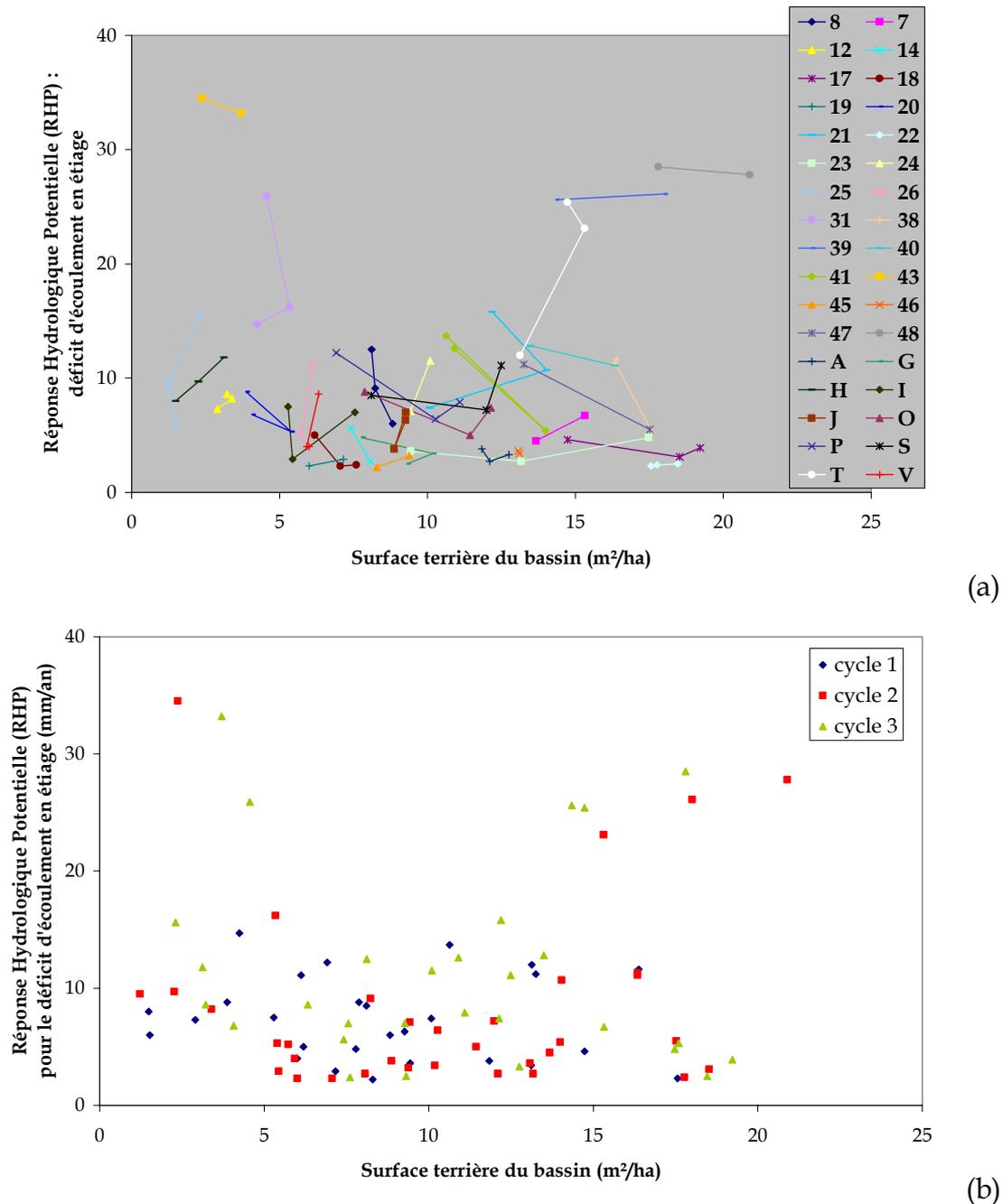
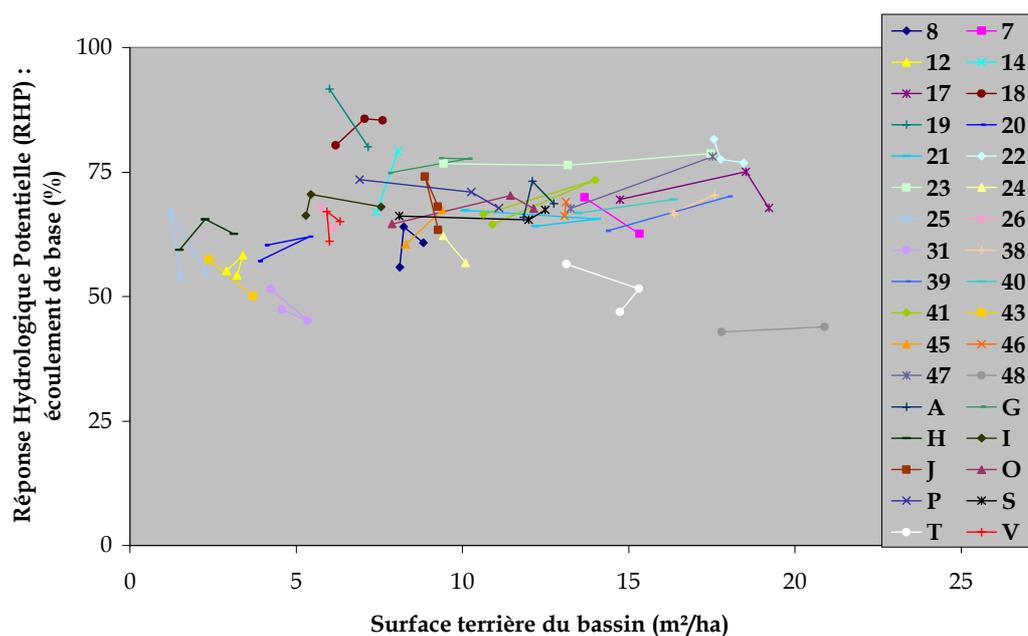


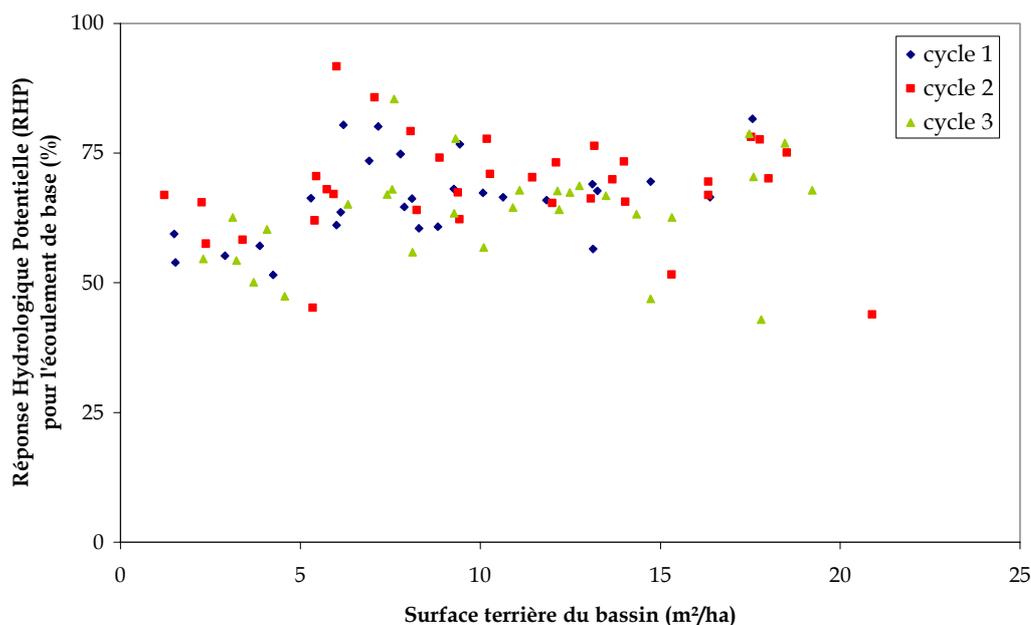
Figure 12.8 : corrélation existante entre l'évolution du déficit d'écoulement en étiage et l'évolution du couvert forestier pour 34 bassins versants du Massif central

Pour le déficit d'écoulement en étiage, il n'apparaît toujours aucune corrélation marquée entre les changements de comportement hydrologique et l'évolution du couvert forestier. Contrairement à l'écoulement total et en crue, il n'apparaît pas non plus de lien entre le couvert forestier et la variabilité de l'écoulement en étiage.

▪ Indice d'écoulement de base



(a)



(b)

Figure 12.9 : corrélation existante entre l'évolution de l'écoulement de base et l'évolution du couvert forestier pour 34 bassins versants du Massif central

Pour l'indice d'écoulement de base, il n'apparaît toujours aucune corrélation entre les changements de comportement hydrologique et l'évolution du couvert forestier.

12.2.3 Synthèse

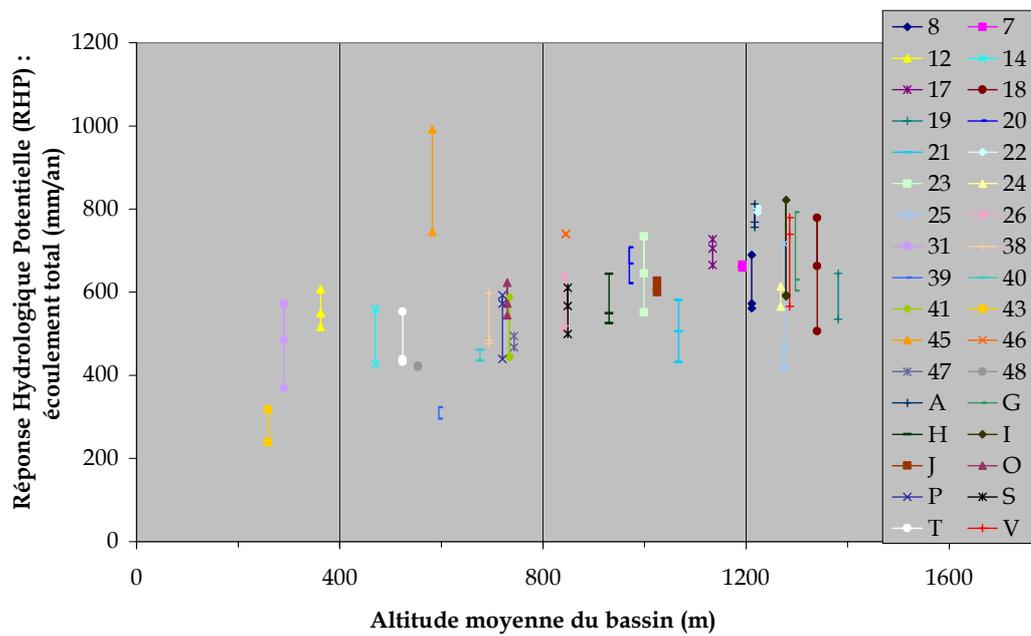
Nos résultats confirment donc les intuitions de la section 12.1 : il n'apparaît pas de lien entre évolution hydrologique et évolution forestière, mais la variabilité

hydrologique semble bien pouvoir être atténuée par le couvert forestier. Il reste cependant à vérifier qu'il ne s'agit pas d'un artefact (section suivante).

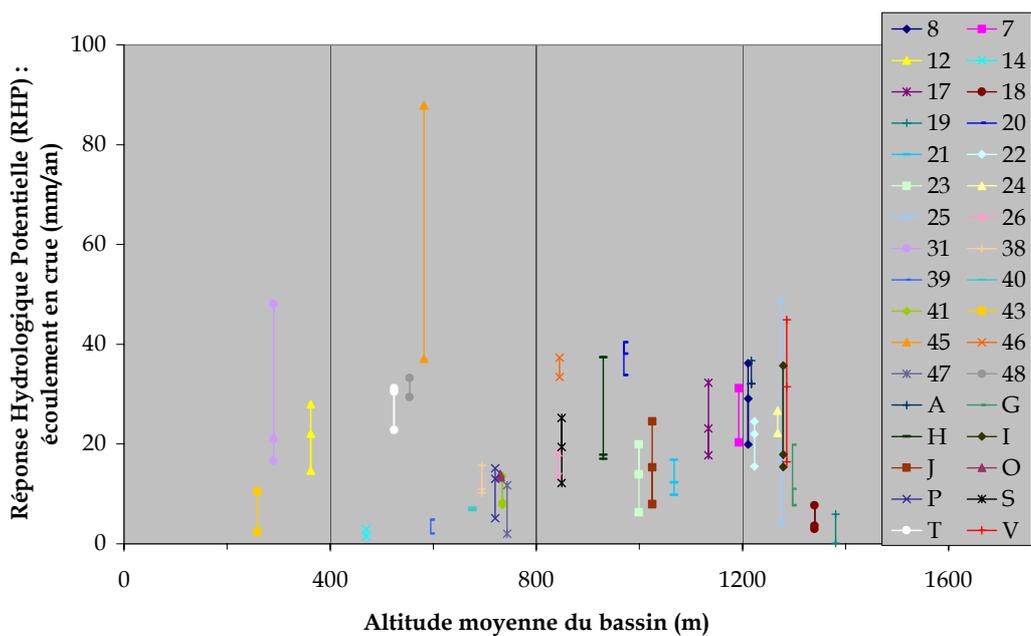
12.3 Le couvert forestier aurait-il un rôle modérateur sur la variabilité de l'écoulement total et de l'écoulement en crue?

L'analyse des résultats que nous avons effectuée n'a pas permis de mettre en évidence de lien entre *l'évolution* du comportement hydrologique et *l'évolution* du couvert forestier. Il est par contre apparu que le couvert forestier (vu sous l'angle de sa surface terrière) semblait inversement corrélé à la variabilité des comportements hydrologiques, au moins pour ce qui est de l'écoulement total et de l'écoulement en crue. Nous discutons à présent cette hypothèse, en vérifiant notamment qu'il n'existe pas d'autres corrélations cachées avec des variables telles que l'altitude ou la pluviométrie.

Nous analysons en Figure 12.10 un possible lien entre l'évolution de l'écoulement total et de l'écoulement en crue et l'altitude moyenne du bassin (vérification nécessaire du fait d'une corrélation positive entre le taux de boisement et l'altitude) : aucun lien n'est apparent.



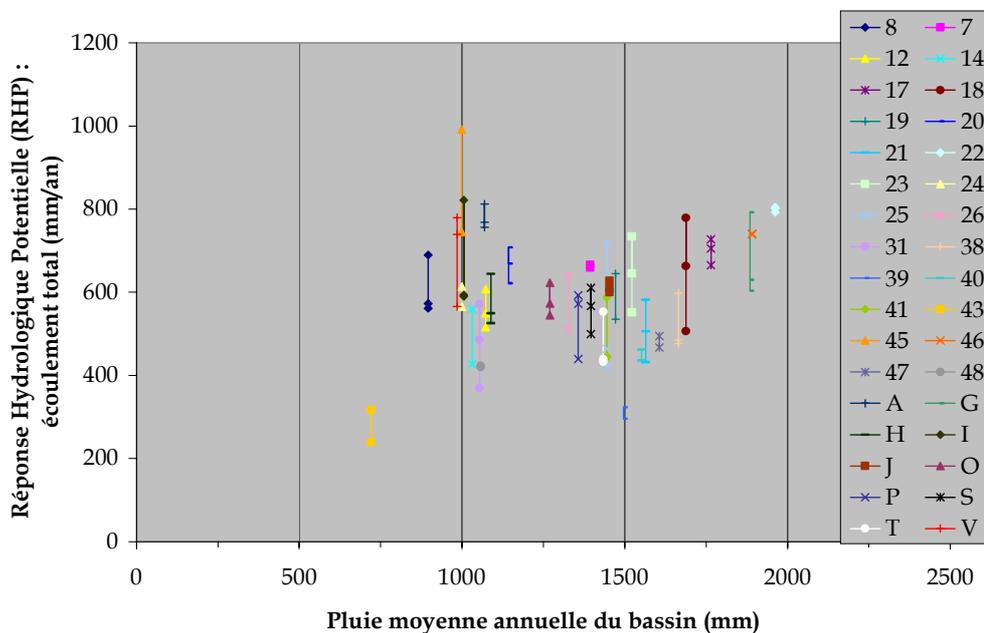
(a)



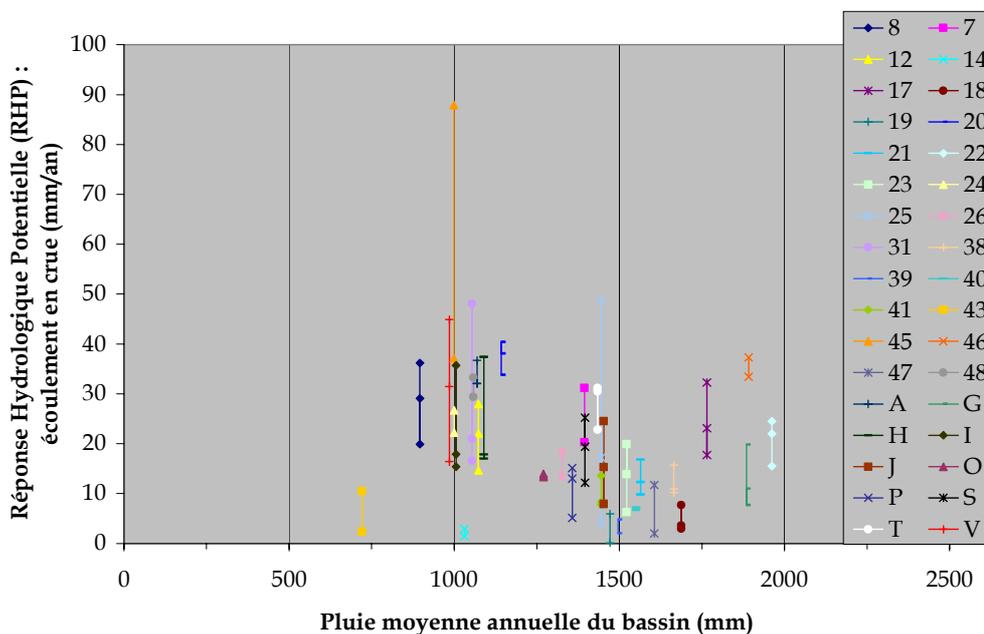
(b)

Figure 12.10 : suivi bassin par bassin de la corrélation entre l'évolution de l'écoulement et l'altitude moyenne du bassin

En Figure 12.11, nous analysons à présent un possible lien entre l'évolution de l'écoulement total et la pluviométrie moyenne du bassin (« normale » obtenue à partir des cartes Aurelhy de Météo France). A nouveau, il n'apparaît aucune corrélation.



(a)



(b)

Figure 12.11 : suivi bassin par bassin de la corrélation entre l'évolution de l'écoulement et la pluviométrie moyenne du bassin

En conclusion, le rôle « modérateur » identifié pour la forêt ne semble pas être un artefact lié aux deux facteurs que sont la pluviométrie et l'altitude.

12.4 Conclusion du chapitre 12

L'analyse effectuée au chapitre 12 a montré que l'influence du couvert forestier sur le comportement hydrologique n'est pas détectable, bassin par bassin. Il n'a notamment pas été possible d'identifier de réponse des bassins à l'augmentation de la surface terrière.

Cependant, il se pourrait qu'il existe un lien entre la variabilité du comportement hydrologique et le couvert forestier, notamment pour les deux variables suivantes : écoulement total et écoulement en crue.

CONCLUSION DE LA SIXIEME PARTIE

Au cours de la sixième partie, nous avons appliqué aux 63 bassins versants du Massif central qui composent notre échantillon d'étude, les tests de détection des tendances mis au point précédemment. Nous avons ainsi pu mettre en évidence une assez forte proportion de bassins versants non-stationnaires, notamment en ce qui concerne l'écoulement total et l'écoulement en crue (avec respectivement 33% et 16% des bassins non-stationnaires). En parallèle, de fortes évolutions du couvert forestier ont été observées, et nous avons donc recherché un lien, qui confirmerait les résultats obtenus sur de nombreux petits bassins versants expérimentaux.

L'analyse statistique effectuée nous permet de tirer les conclusions suivantes :

- à l'échelle d'un bassin versant, l'influence du couvert forestier sur le comportement hydrologique n'est pas détectable, bassin par bassin, de façon nette.
- à l'échelle régionale, nous avons pu cependant montrer qu'il existe probablement une relation entre la variabilité des comportements hydrologiques et la densité de boisement. Cette relation existe pour au moins deux composantes du comportement hydrologique (l'écoulement total et l'écoulement en crue), et se traduit par un seuil d'environ 10 m²/ha de surface terrière, en deçà duquel les comportements sont fortement variables d'une période à l'autre. La densité forestière semble jouer ici un rôle d'atténuation de la variabilité hydrologique. Notons que nous avons pu vérifier qu'il ne s'agissait probablement pas d'un artefact lié à l'altitude des bassins ou leur pluviométrie moyenne.

Ainsi, par rapport à l'une des questions que nous nous posions dans cette thèse, qui consistait à savoir si les résultats expérimentaux obtenus à l'échelle de tous petits bassins versants pouvaient être retrouvés sur des bassins versants plus grands, ceux qui intéressent les gestionnaires de la ressource, la réponse est claire : NON. Que ce soit bassin par bassin ou plus régionalement, on ne retrouve pas les liens attendus (diminution de l'écoulement total et de l'écoulement en crue avec le couvert forestier, augmentation du déficit en étiage). On identifie par contre un lien relativement inattendu, en ce qui concerne la variabilité du comportement hydrologique : à l'échelle régionale, la variabilité semble s'atténuer un peu (pour l'écoulement total et pour les crues) avec l'augmentation du couvert forestier.

Conclusion générale

Nous présentons ici un bilan des résultats obtenus au cours de cette thèse, qui rassemble des travaux effectués sur une période de sept ans (1995-2002). Nous avons organisé ce bilan en fonction des trois objectifs cités en introduction :

1. comprendre l'histoire du débat sur le rôle hydrologique des forêts ;
2. évaluer la capacité des modèles pluie-débit à détecter des changements ;
3. étudier le lien entre non-stationnarité hydrologique et évolution forestière dans le Massif central.

Résultats historiques

Les controverses actuelles sur le rôle hydrologique de la forêt sont bien plus anciennes qu'il ne semble (nous avons pu remonter jusqu'à Pline l'ancien), et leur vivacité reflète elle-même la violente polémique qui a opposé en France les ingénieurs des Ponts et Chaussées aux officiers des Eaux et Forêts au 19^{ème} siècle.

Cette polémique est à l'origine des premiers suivis de bassins versants « expérimentaux », initiés au 19^{ème} siècle par l'ingénieur Belgrand et par les forestiers Jeandel, Cantégril et Bellaud. Si la faiblesse des moyens financiers et techniques disponibles à l'époque ne leur a pas permis de conclure, la voie qui avait été tracée permettait d'envisager de nombreux développements scientifiques, qui ne se sont malheureusement pas concrétisés en France, mais aux Etats-Unis où, à partir de 1910, des expérimentations fondées sur le principe des bassins versants appariés ont vu le jour.

La compilation des résultats obtenus sur des bassins versants appariés montre indéniablement que la forêt consomme plus d'eau qu'un autre type de couvert

végétal. En revanche, l'influence de la forêt sur les crues n'est simple qu'en apparence : si les déboisements expérimentaux entraînent un accroissement des pics de crue, le reboisement de terres agricoles n'occasionne que de très faibles réductions des crues. En général, il semble que les crues de fréquences rares soient peu affectées par le boisement ou le reboisement.

Résultats méthodologiques : *nous disposons à présent d'un test efficace pour détecter les changements graduels dans la relation pluie-débit*

Les travaux que nous avons effectués sur les modèles pluie-débit ont concerné d'une part leur sensibilité aux données d'entrée, et d'autre part leur possibilité d'utilisation pour détecter des tendances.

Sensibilité des modèles pluie-débit

Les données climatiques de forçage du bassin versant doivent être connues si l'on souhaite analyser son comportement hydrologique, mais la variabilité spatiale et temporelle de la pluie et de l'évaporation sur un bassin versant fait que notre connaissance est entachée de nombreuses incertitudes. C'est ce qui a justifié les études de sensibilité conduites aux chapitres 5 et 6, où nous avons essayé de comprendre quelle pouvait être l'influence de ces incertitudes sur un modèle pluie-débit, que nous devons utiliser pour analyser la relation pluie-débit des bassins versants étudiés. Nos travaux ont concerné des modèles conceptuels de type global (GR4J et parfois TOPMO), et nous pensons qu'ils sont représentatifs de l'ensemble des modèles de cette catégorie. Il apparaît que:

- les modèles analysés sont assez peu sensibles aux variations spatiales de l'ETP, car ils ont la possibilité au travers de la fonction de production de compenser d'éventuelles sur- ou sous-estimations, tant qu'elles restent dans des limites raisonnables. Il se pourrait également que l'ETP de Penman ne soit pas une entrée très pertinente pour le modèle : une thèse sur ce sujet est actuellement en cours au Cemagref;
- ces modèles réagissent en revanche positivement à une amélioration de la qualité d'estimation de la pluie de bassin, tout en manifestant une certaine adaptabilité vis à vis de cette estimation. La parcimonie permet aux paramètres du modèle GR de réagir de façon cohérente à l'amélioration de la qualité de l'information pluviométrique, ce qui n'est pas le cas pour tous les paramètres de TOPMO.

Globalement, il faut souligner l'adaptabilité assez remarquable des modèles étudiés (et notamment de GR4J). L'étude de la bibliographie a montré qu'étrangement, les études de sensibilité menées par les hydrologues négligeaient presque toujours cette adaptabilité, en adoptant une démarche que nous avons qualifiée de « statique », et qui considère les paramètres des modèles comme absolus, en leur attribuant une justification physique, et donc une justification indépendamment de possibles

erreurs sur les données d'entrées. Les analyses de sensibilité « dynamiques » telles que celles que nous avons menées traduisent quant à elles une reconnaissance des limites des modèles pluie-débit, et de la dépendance (qui transparait notamment dans des conditions opérationnelles) qui existe entre paramètres estimés et données climatiques d'entrée.

Détection de changements au moyen de modèles pluie-débit

Au cours de cette thèse, nous avons cherché à développer des méthodes permettant de détecter une non-stationnarité dans le comportement hydrologique d'un bassin versant. Nous avons ainsi développé trois tests de complexité croissante, pouvant être appliqués à une caractéristique hydrologique du bassin, telle que l'écoulement total, l'écoulement en crue ou en étiage, l'écoulement de base. Ces trois tests ont été validés sur des bassins versants expérimentaux et ont pu ainsi faire la preuve de leur capacité à détecter des changements progressifs tels que ceux qui interviennent lors de la croissance d'un couvert forestier sur un bassin versant initialement en culture.

En elle-même, l'analyse des cas d'école s'est révélée riche d'enseignements :

- L'analyse des données du bassin 172 de Coshocton, où l'on suit depuis 60 ans une expérience de reboisement de terres agricoles, a montré que le rendement en eau du bassin versant évoluait au plus pendant les trente premières années puis se stabilisait ;
- Sur le bassin versant du Réal Collobrier, on a été surpris de détecter que les bassins versants que l'on considérait comme une référence « stable » semblent en réalité se trouver... en pleine évolution. La même remarque est valable pour le bassin 196 de Coshocton et le bassin 2 d'Andrews Experimental Forest.

Résultats concernant l'impact hydrologique de la forêt : les résultats des bassins expérimentaux ne sont pas confirmés sur notre échantillon du Massif central

Ayant appliqué aux 63 bassins versants du Massif central qui composent notre échantillon d'étude les tests de non-stationnarité, nous avons pu mettre en évidence une certaine proportion de bassins versants non-stationnaires, notamment en ce qui concerne l'écoulement total et l'écoulement en crue (avec respectivement 33% et 16% des bassins non-stationnaires). En parallèle, de fortes évolutions du couvert forestier ont été observées, et nous avons donc recherché un lien, qui confirmerait les résultats obtenus sur de nombreux petits bassins versants expérimentaux. L'analyse statistique n'a mis en évidence aucun lien significatif, et nous concluons donc que pour notre zone d'étude et à l'échelle à laquelle nous avons travaillé, une évolution graduelle du couvert forestier n'a pas de conséquence détectable sur le comportement hydrologique des bassins versants. Nous avons pu cependant montrer que l'occurrence de fortes non-stationnarités était restreinte aux bassins versants peu boisés : pour l'écoulement total et l'écoulement en crue, il existe une (faible) relation entre la variabilité hydrologique et la densité de boisement d'un

bassin versant. Cette relation se traduit par l'existence d'un seuil à environ 10 m²/ha de surface terrière, en deçà duquel les comportements sont fortement variables d'une période à l'autre. La densité forestière jouerait donc un rôle d'atténuation (rôle tampon) de la variabilité hydrologique.

Et après ?

Du point de vue de la modélisation hydrologique, le résultat le plus innovant de cette thèse est la mise au point de tests non-paramétriques de détection de tendance. Il nous semble que ces tests ouvrent de nombreuses perspectives d'utilisation, à la fois pour prendre la mesure de changements en œuvre à l'échelle globale, que pour essayer de comprendre la cause de changements plus ponctuels.

Développer l'utilisation des tests de détection de tendance pour quantifier les changements en cours

1. La première piste de recherche à laquelle nous pensons consisterait en une application des tests développés dans cette thèse sur un échantillon de grande taille (à l'échelle nationale en France ou aux Etats-Unis par exemple), afin de pouvoir quantifier les changements hydrologiques à l'œuvre, et de les remettre en perspective par rapport aux conséquences possibles de changements climatiques.

Il serait particulièrement instructif d'appliquer nos tests de détection aux bassins versants dits « de référence » des bassins versants expérimentaux : en effet, les tests que nous avons mis en œuvre sur le BVRE du Réal Collobrier, sur les bassins de recherche de Coshocton et d'Andrews ont montré que certains de ces bassins étaient en effet eux-même non-stationnaires. Une telle information, si elle est vérifiée, pourrait remettre en cause certaines conclusions en provenance de ces bassins versants de recherche.

Une application large de nos tests nous permettra certainement de mieux en préciser les limites, et éventuellement de proposer des améliorations. Certaines non-stationnarités pourraient être des artefacts liés aux limites du modèle utilisé ou au pas de temps d'investigation. Sur la base des travaux en cours au Cemagref sur une suite de modèle fonctionnant aux pas de temps annuel, mensuel, journalier (et horaire à l'avenir), nous pourrions proposer une application combinée à plusieurs pas de temps, destinée à mieux prendre en compte les différentes facettes du comportement hydrologique.

Comprendre les raisons des tendances observées

2. Cette thèse a représenté une tentative d'explication des changements de comportement hydrologique, en utilisant le couvert forestier comme variable explicative. L'analyse statistique n'a mis en évidence aucun lien significatif, et nous avons donc conclu que, pour notre zone d'étude et les bassins de la taille

étudiée, une évolution graduelle du couvert forestier n'a pas de conséquence détectable sur le comportement hydrologique des bassins versants. Ceci n'enlève cependant rien à la réalité des tendances observées, qu'il reste souhaitable d'expliquer.

Poursuivre l'acquisition de données hydro-météorologiques

3. Les travaux présentés dans cette thèse utilisent exclusivement des données acquises par d'autres. Cette approche est incontournable si l'on souhaite travailler sur de longues séries, et aboutir à des résultats d'une certaine généralité. Mais d'autre part, nous pensons souhaitable que chacun participe à l'effort de collecte de données, dans l'intérêt de la communauté hydrologique mais aussi pour acquérir une vigilance par rapport aux données acquises par les autres. Nous avons mis en place en 1998-99, sur le bassin versant de recherche de l'Orgeval, un suivi de trois petits bassins versants (l'un forestier, le second agricole, le dernier mixte), pour lesquels nous commençons à disposer de séries de données suffisamment longues permettant d'étudier et de modéliser le rôle de la forêt, et les règles de composition de signatures « mixtes » (forêt-culture). Nous pensons important de poursuivre l'effort de collecte, afin d'offrir aux générations d'hydrologues futures les données qui leur permettront de résoudre les questions qui se poseront à la société.

Références bibliographiques

1. Andréassian, V. et Margat, J., 1997. Prospective des besoins en eau mondiaux à l'horizon 2025. *Ingénieries - EAT* (Numéro spécial prospective et environnement): 17-34.
2. Badré, L., 1983. Histoire de la forêt française. Arthaud, Paris, 310 pp.
3. Bainville, V. et Ladoy, P., 1995. Préoccupations environnementales au début du XIXe siècle: la circulaire n°18 du 25 avril 1821. *La Météorologie*(numéro spécial avril 1995): 88-94.
4. Bastin, G., Lorent, B., Duqué, C. et Gevers, M., 1984. Optimal estimation of the average areal rainfall and optimal selection of rain gauge locations. *Water Resources Research*, 20(4): 463-470.
5. Bates, C.G. et Henry, A.J., 1928. Forest and streamflow experiment at Wagon Wheel Gap, Colorado. *Mon. Weather Rev. Suppl.*, 30: 1-79.
6. Baudrillart, J.J., 1823. *Traité général des Eaux et Forêts, chasses et pêches*, 1. Chez Arthus Bertrand, Paris, 816 pp.
7. Becquerel, A.-C., 1853. Des climats et de l'influence qu'exercent les sols boisés et non boisés. Firmin Didot frères, Paris, 366 pp.
8. Becquerel, A.-C., 1865. *Mémoire sur les forêts et leur influence climatérique*. Firmin-Didot frères, Paris, 150 pp.
9. Belgrand, E., 1853. De l'influence des forêts sur l'écoulement des eaux pluviales. *Annuaire de la Société Météorologique de France*, 1: 176-193.
10. Belgrand, E., 1854a. De l'influence des forêts sur l'écoulement des eaux. *Annales des Ponts et Chaussées*(61): 1-27.
11. Belgrand, E., 1854b. De l'influence des forêts sur l'écoulement des eaux pluviales. *Annuaire de la Société Météorologique de France*, 2: 81-87.
12. Benichou, P. et Le Breton, O., 1987. Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques. *La Météorologie*(19): 23-34.

Références bibliographiques

13. Bergström, S., 1995. The HBV model. In: V.P. Singh (Editor), Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO., pp. 443-476.
14. Bernard, C., 1927. Cours de restauration des terrains en montagne, 1. Ecole Nationale des Eaux et Forêts, Nancy, 431 pp.
15. Berndtsson, R. et Niemczynowicz, J., 1988. Spatial and temporal scales in rainfall analysis - some aspects and future perspectives. *Journal of Hydrology*, 100: 293-313.
16. Beschta, R.L., Pyles, M.R., Skaugset, A.E. et Surfleet, C.G., 2000. Peakflow responses to forest practices in the western cascades of Oregon, USA. *Journal of Hydrology*, 233: 102-120.
17. Beven, K.J., 1989. Changing ideas in hydrology - the case of physically-based models. *Journal of Hydrology*, 105: 157-172.
18. Beven, K.J., 1993. Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modelling. *Advances in Water Resources*, 16: 41-51.
19. Beven, K.J. et Hornberger, G.M., 1982. Assessing the effect of spatial pattern of precipitation in modeling stream flow hydrographs. *Water Resources Bulletin*, 18(5): 823-829.
20. Beven, K.J., Lamb, R., Quinn, P., Romanovicz, R. et Freer, J., 1995. TOPMODEL. In: V.P. Singh (Editor), Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO., pp. 627-668.
21. Bosch, J.M. et Hewlett, J.D., 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 55: 3-23.
22. Bouabdallah, F., 1997. Mise au point d'un modèle de transformation pluie-débit au pas de temps annuel. Mémoire de DEA, Université Paris Sud, Orsay, 33 pp.
23. Boussingault, J.-B., 1837. Mémoire sur l'influence des défrichements dans la diminution des cours d'eau. *Annales de Chimie*, 64: 113-141.
24. Box, G.E. et Jenkins, G.M., 1976. Time series analysis: forecasting and control. Holden-Day, Oakland, CA, 575 pp.
25. Brandt, M., Bergström, S. et Gardelin, M., 1988. Modelling the effects of clearcutting on runoff - examples from central Sweden. *Ambio*, 17(5): 307-313.
26. Bras, R.L., 1979. Sampling of interrelated random fields: the rainfall-runoff case. *Water Resources Research*, 15(6): 1767-1780.
27. Bras, R.L. et Colon, R., 1978. Time-averaged mean of precipitation: estimation and network design. *Water Resources Research*, 14(5): 878-888.
28. Bras, R.L. et Rodriguez-Iturbe, I., 1976. Rainfall network design for runoff prediction. *Water Resources Research*, 12(6): 1197-1208.
29. Brémontier, N.T., 1793 (an V). Mémoire sur les dunes. Imprimerie de la République, Paris, 73 pp.
30. Burnash, R.J.C., 1995. The NWS river forecast system - catchment modeling. In: V.P. Singh (Editor), Computer models of watershed hydrology. Water resources publications, Highlands ranch, CO., pp. 311-366.
31. Burton, T.A., 1997. Effects of basin-scale timber harvest on water yield and peak streamflow. *Journal of the American Water Resources Association*, 33(6): 1187-1196.

Références bibliographiques

32. Calder, I.R., 1990. Evaporation in the Uplands. John Wiley and sons, Chichester, 148 pp.
33. Calder, I.R., 1992. A model of transpiration and growth of *Eucalyptus* plantation in water-limited conditions. *Journal of Hydrology*, 130: 1-15.
34. Calder, I.R., Hall, R.L. et Prasanna, K.T., 1993. Hydrological impact of *Eucalyptus* plantation in India. *Journal of Hydrology*, 150(2-4): 635-648.
35. CERESTA, 1986. Aide-mémoire pratique des techniques statistiques. *Revue de Statistique Appliquée*, 34(numéro special): 134-136.
36. Cézanne, E., 1872. Suite de l'étude sur les torrents des Hautes-Alpes. Dunod, Paris, 382 pp.
37. Champion, M., 1858. Les inondations en France depuis le VI^e siècle jusqu'à nos jours, 1. Victor Dalmont, Paris, 244 pp.
38. Chaudey, M., 1921. Météorologie et reboisements. Direction Générale des Eaux et Forêts, Paris, 10 pp.
39. Chevrou, R.B., 1988. Inventaire Forestier National, méthodes et procédures. IFN, Montpellier, 105 pp.
40. Chow, V.T., 1964. Handbook of applied hydrology. McGraw-Hill, New York.
41. Collectif, 1987. Histoire de l'Administration Française : les Eaux et Forêts du 12^e au 20^e siècle. Editions du CNRS, Paris, 767 pp.
42. Cornish, P.M., 1993. The effects of logging and forest regeneration on water yields in a moist eucalypt forest in New South Wales, Australia. *Journal of Hydrology*, 150: 301-322.
43. Cornish, P.M. et Vertessy, R.A., 2001. Forest age-induced changes in evapotranspiration and water yield in a eucalypt forest. *Journal of Hydrology*, 242: 43-63.
44. Cosandey, C., 1993. Forêt et écoulements : Rôle de la forêt sur la formation des crues et le bilan d'écoulement annuel. Impact d'une coupe forestière, CNRS, Meudon.
45. Cosandey, C., 1995. La forêt réduit-elle l'écoulement annuel ? *Annales de Géographie*(581-582): 7-25.
46. Creutin, J.D. et Obled, C., 1982. Objective analyses and mapping techniques for rainfall fields: and objective comparison. *Water Resources Research*, 18(2): 413-431.
47. Dausse, M., 1842. De la pluie et de l'influence des forêts sur les cours d'eau. *Annales des Ponts et Chaussées*, 3(Mars-Avril): 184-209.
48. Davis, D.R., Kisiel, C.C. et Duckstein, L., 1972. Optimum design of mountainous raingage networks using bayesian decision theory. 326, WMO.
49. Dawdy, D.R. et Bergmann, J.M., 1969. Effect of rainfall variability on streamflow simulation. *Water Resources Research*, 5(5): 958-966.
50. de Marsily, G., 1994. Quelques réflexions sur l'utilisation des modèles en hydrologie. *Revue des Sciences de l'Eau*, 7: 219-234.
51. de Saint Pierre, B.J.H., 1787. Etudes de la nature, 2. Imprimerie de Monsieur, Paris.
52. Demontzey, P., 1882. Traité pratique du reboisement et du gazonnement des montagnes. Rothschild, Paris, 528 pp.

Références bibliographiques

53. Demontzey, P., 1894. L'extinction des torrents en France par le reboisement. Imprimerie Nationale, Paris, 459 pp.
54. Dugied, P.H., 1819. Projet de reboisement des Basses-Alpes. Imprimerie Royale, Paris, 113 p pp.
55. Duncan, M.R., Austin, B., Fabry, F. et Austin, G.L., 1993. The effect of gauge sampling density on the accuracy of streamflow prediction for rural catchments. *Journal of Hydrology*, 142: 445-476.
56. Eagleson, P.S., 1984. The distribution of catchment coverage by stationary rainstorms. *Water Resources Research*, 20(5): 581-590.
57. Ebermayer, E., 1879. Comment évaluer l'influence des forêts sur l'abondance des sources? (*en allemand*). *Forstwirtschaftliches Centralblatt*.
58. Edijatno, 1991. Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier. Thèse, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 242 pp.
59. Edijatno, Nascimento, N., Yang, X., Makhlouf, Z. et Michel, C., 1999. GR3J: a daily watershed model with three free parameters. *Hydrological Sciences Journal*, 44(2): 263-278.
60. Engler, A., 1919. Untersuchungen über den Einfluß des Waldes auf den stand der Gewässer. Kommissionsverlag Beer, Zürich, 626 pp.
61. Eschner, A.R. et Satterlund, D.R., 1966. Forest protection and streamflow from an Adirondack watershed. *Water Resources Research*, 2(4): 765-783.
62. Fabre, L.A., 1902. Forêt et navigabilité en Gascogne. Imprimerie G. Gounouilhou, Bordeaux, 12 pp.
63. Fabre, L.A., 1904. Recherches sur le ruissellement superficiel. Edouard Privat, Toulouse, 16 pp.
64. Fennessey, N.M. et Vogel, R.M., 1996. Regional models of potential evaporation and reference evapotranspiration for the northeast USA. *Journal of Hydrology*, 184: 337-354.
65. Fritsch, J.-M., 1990. Les effets du défrichement de la forêt amazonienne et de la mise en culture sur l'hydrologie des petits bassins versants. Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 392 pp.
66. Gentien-Baudry, V., 1999. La modélisation pluie-débit sur les bassins versants de Nouvelle Calédonie. Mémoire de DEA, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 61 pp.
67. Giono, J., 1983 (1953). L'homme qui plantait des arbres. Gallimard, Paris.
68. Gole, C.V., Kulkarni, G.A. et Khatavkar, G.D., 1972. Study of orographic effect on optimum number of raingages. 326, WMO.
69. Goodrich, D.C., Faurès, J.-M., Woolhiser, D.A., Lane, L.J. et Sorooshian, S., 1995. Measurement and analysis of small-scale convective storm rainfall variability. *Journal of Hydrology*, 173: 283-308.
70. Hamlin, M.J., 1983. The significance of rainfall in the study of hydrological processes at basin scale. *Journal of Hydrology*, 65: 73-94.
71. Havnø, K., Madsen, M.N. et Dørge, J., 1995. Mike 11 - A generalized river modelling package. In: V.P. Singh (Editor), *Computer models of watershed hydrology*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO., pp. 733-782.
72. Hendrick, R.L. et Comer, G.H., 1970. Space variations of precipitation and implications for raingage network design. *Journal of Hydrology*, 10: 151-163.

Références bibliographiques

73. Hershfield, D.M., 1967. Rainfall input for hydrological models, General assembly of the IASH. IASH, Bern, pp. 177-188.
74. Hervieu, F., 2001. Quelle ETP pour un modèle pluie-débit? Mémoire de DEA, Université Paris-Sud XI, Orsay, 83 pp.
75. Hewlett, J.D., 1971. Comments on the catchment experiment to determine vegetal effects on water yield. *Water Resources Bulletin*, 7(2): 376-381.
76. Hewlett, J.D., 1982. *Principles of Forest Hydrology*. The University of Georgia Press, Athens, 183 pp.
77. Hibbert, A.R., 1967. Forest treatment effects on water yield. In: W.E. Sopper et H.W. Lull (Editors), *Forest Hydrology : Proceedings of a National Science Foundation Advanced Science Seminar*. Pergamon Press, Oxford, pp. 527-543.
78. Hibbert, A.R., 1971. Increases in streamflow after converting chaparral to grass. *Water Resources Research*, 7(1): 71-80.
79. Hibbert, A.R., Davis, E.A. et Brown, T.C., 1975. Managing chaparral for water and other resources in Arizona, *Watershed Management Symposium*. ASCE, Logan, Utah, pp. 445-468.
80. Hibbert, A.R., Davis, E.A. et Scholl, D.G., 1974. Chaparral conversion potential in Arizona. Part I: water yield response and effects on other resources. RM 127, USDA Forest Service Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Fort Collins.
81. Hornbeck, J.W., Adams, M.B., Corbett, E.S., Verry, E.S. et Lynch, J.A., 1993. Long-term impacts of forest treatments on water yield: a summary for northeastern USA. *Journal of Hydrology*, 150(2-4): 323-344.
82. Hornbeck, J.W., Martin, C.W. et Eagar, C., 1997. Summary of water yield experiments at Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire. *Canadian Journal of Forest Research*, 27: 2043-2052.
83. Hsu, K., Gupta, H.V. et Sorooshian, S., 1995. Artificial neural network modeling of the rainfall-runoff process. *Water Resources Research*, 31(10): 2517-2530.
84. Hudson, J.A., Crane, S.B. et Blackie, J.R., 1997a. The Plynlimon water balance 1969-1995 : the impact of forest and moorland vegetation on evaporation and streamflow in upland catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 1(3): 409-427.
85. Hudson, J.A., Crane, S.B. et Robinson, M., 1997b. The impact of the growth of new plantation forestry on evaporation and streamflow in the Llanbrynmair catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 1(3): 463-475.
86. Jacquot, A., 1909. *La forêt et son rôle dans la nature et les sociétés*, Paris.
87. Jakeman, A.J. et Hornberger, G.M., 1993. How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model ? *Water Resources Research*, 29(8): 2637-2649.
88. Jakeman, A.J., Littlewood, I.G. et Whitehead, P.G., 1990. Computation of the instantaneous unit hydrograph and identifiable component flows with application to two small upland catchments. *Journal of Hydrology*, 117: 275-300.
89. Jeandel, F., Cantégril, J.B. et Bellaud, L., 1862. *Etudes expérimentales sur les inondations*. Bureau des Annales Forestières, Paris, 144 pp.
90. Jettmar, U.R., Young, G.K., Farnsworth, R.K. et Schaake, J.C., 1979. Design of operational precipitation and streamflow networks for river forecasting. *Water Resources Research*, 15(6): 1823-1832.

Références bibliographiques

91. Kauark-Leite, L.-A. et Nascimento, N., 1993. Développement, utilisation et incertitudes des modèles conceptuels en hydrologie, Séminaire Eaux-Environnement n°3, Modélisation du comportement des polluants dans les hydrosystèmes, Paris, pp. 191-219.
92. Kelway, P.S., 1974. A scheme for assessing the reliability of interpolated rainfall estimates. *Journal of Hydrology*, 21: 247-267.
93. Kittredge, J., 1948. *Forest influences : the effects of woody vegetation on climate, water and soil, with applications to the conservation of water and the control of floods and erosion*. McGraw Hill, New York, 394 pp.
94. Klemeš, V., 1986. Operational testing of hydrologic simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, 31(1): 13-24.
95. Kribèche, R., 1994. Etude de la sensibilité d'un modèle pluie-débit à l'exactitude de l'évaporation (modèle GR4J). Mémoire de DEA, Université Paris XII, Créteil, 42 pp.
96. Kuczera, G., 1987. Prediction of water yield reductions following a bushfire in ash-mixed species eucalypt forest. *Journal of Hydrology*, 94: 215-236.
97. Lamarck, J.-B., 1820. *Système analytique des connaissances positives de l'homme*. Chez l'Auteur et Belin, Paris, 364 pp.
98. Langford, K.J. et McGuinness, J.L., 1976. A comparison of modeling and statistical evaluation of hydrologic change. *Water Resources Research*, 12(6): 1322-1324.
99. Larrède, R. et Nougarède, O., 1993. *Des hommes et des forêts*. Gallimard, Paris, 128 pp.
100. Lavabre, J., Sempere Torres, D. et Cernesson, F., 1993. Changes in the hydrological response of a small Mediterranean basin a year after a wildfire. *Journal of Hydrology*, 142: 273-299.
101. Le Bloas, J., 1994. Etude de définition de nouvelles stratégies pour l'occupation de l'espace dans une optique de valorisation des ressources en eau, DATAR Massif central.
102. Lebel, T., Bastin, G., Obled, C. et Creutin, J.D., 1987. On the accuracy of areal rainfall estimation: a case study. *Water Resources Research*, 23(11): 2123-2134.
103. Lévy-Leblond, J.-M., 2000. *Impasciences*. Bayard, Paris, 189 pp.
104. Linsley, R.K. et Crawford, N.H., 1965. Coordination of precipitation and streamflow networks, Symposium on the design of hydrological networks. IAHS, Québec, pp. 617-629.
105. Littlewood, I.G., Down, K., Parker, J.R. et Post, D.A., 1997. The PC version of IHACRES for catchment-scale rainfall-streamflow modelling. Version 1.0. User Guide. Institute of Hydrology, Wallingford, 89 pp.
106. Lørup, J.K., Refsgaard, J.C. et Mazvimavi, D., 1998. Assessing the effect of land use change on catchment runoff by combined use of statistical tests and hydrological modelling: case studies from Zimbabwe. *Journal of Hydrology*, 205: 147-163.
107. L'vovitch, M.I., 1979. *World water resources and their future*. American Geophysical Union, Washington.
108. Margat, J., 1998. Combien d'eau utilise-t-on et use-t-on? Pour quoi faire? In: J. Margat et J.-R. Tiercelin (Editors), *L'eau en questions*. Romillat, Paris, pp. 43-83.

Références bibliographiques

109. Mariani, T., 1994. Rapport de la commission d'enquête sur les causes des inondations et les moyens d'y remédier, 1. Assemblée Nationale, Paris, 127 pp.
110. Matthieu, A., 1878. Météorologie comparée agricole et forestière. Imprimerie Nationale, Paris, 70 pp.
111. McCulloch, J.S.G. et Robinson, M., 1993. History of forest hydrology. *Journal of Hydrology*, 150: 189-216.
112. McGuinness, J.L. et Harrold, L., 1971. Reforestation influences on small watershed streamflow. *Water Resources Research*, 7(4): 845-852.
113. Melching, C.S., 1995. Reliability estimation. In: V.P. Singh (Editor), *Computer models of watershed hydrology*. Water resources publications, Highlands ranch, CO., pp. 69-118.
114. Michaud, J. et Sorooshian, S., 1994a. Comparison of simple versus complex distributed runoff models on a midsized semiarid watershed. *Water Resources Research*, 30(3): 593-605.
115. Michaud, J.D. et Sorooshian, S., 1994b. Effect of rainfall-sampling errors on simulations of desert flash floods. *Water Resources Research*, 30(10): 2765-2775.
116. Monteith, J.L., 1965. Evaporation and the environment, The state and movement of water in living organisms, XIXth symposium. Cambridge University Press, Swansea, pp. 205-234.
117. Morrissey, M.L., Maliekal, J.A., Greene, J.S. et Wang, J., 1995. The uncertainty of simple spatial averages using rain gauge networks. *Water Resources Research*, 31(8): 2011-2017.
118. Muraz, J., Durrieu, S., Labbé, S., Andréassian, V. et Tangara, M., 1999. Comment valoriser les photos aériennes dans les SIG? *Ingénieries - EAT*, 20(39-58).
119. Nascimento, N., 1995. Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'actions anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 447 pp.
120. Nash, J.E. et Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I - a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10: 282-290.
121. O'Connell, P.E., 1982. Raingauge network design - a review. In: V.P. Singh (Editor), *Modeling components of hydrologic cycle*. Water resources publications, Littleton, CO., pp. 13-50.
122. O'Connell, P.E. et al., 1979. A case study of rationalization of a rain gage network in southwest England. *Water Resources Research*, 15(6): 1813-1822.
123. Ouédraogo, M., 1996. Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit autour des années 1970 en Côte d'Ivoire. Mémoire de DEA, Université Montpellier II, Montpellier, 56 pp.
124. Pardé, J. et Bouchon, J., 1988. Dendrométrie. ENGREF, Nancy, 328 pp.
125. Pardé, M., 1930. La forêt et les cours d'eau. Résultats d'expériences. *Revue de Géographie Alpine*, 18: 189-200.
126. Penman, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. London*, 193: 120-145.
127. Perreault, L., Bernier, J., Bobée, B. et Parent, E., 2000a. Bayesian change-point analysis in hydrometeorological time series. Part 1. The normal model revisited. *Journal of Hydrology*, 235(3-4): 221-241.

Références bibliographiques

128. Perreault, L., Bernier, J., Bobée, B. et Parent, E., 2000b. Bayesian change-point analysis in hydrometeorological time series. Part 2. Comparison of change-point models and forecasting. *Journal of Hydrology*, 235(3-4): 242-263.
129. Perrin, C., 2000. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de Doctorat, INPG, Grenoble, 530 pp.
130. Phanartzis, C.A., 1972. Spatial variability of precipitation in the San Dimas Experimental Forest and its effect on simulated streamflow. 11, University of Arizona, Tucson.
131. Pinchot, G., 1905. A primer of forestry. Bureau of Forestry, U.S. Dept. of Agriculture, Government Printing Office, Washington.
132. Plaisance, G., 1979. La forêt française. Denoël, Paris, 373 pp.
133. Rauch, F.A., 1801 (an X)-a. Harmonie hydro-végétale et météorologique ou recherches sur les moyens de recréer avec nos forêts la force des températures et la régularité des saisons, par des plantations raisonnées, 2. Chez les frères Levraut, Paris, 299 pp.
134. Rauch, F.A., 1801 (an X)-b. Harmonie hydro-végétale et météorologique ou recherches sur les moyens de recréer avec nos forêts la force des températures et la régularité des saisons, par des plantations raisonnées, 1. Chez les frères Levraut, Paris, 375 pp.
135. Rauch, F.A., 1818a. Régénération de la nature ou recherches sur les moyens de recréer dans tous les climats, les anciennes températures et l'ordre primitif des saisons, par des plantations raisonnées., 1. Didot l'aîné, Paris, 499 pp.
136. Rauch, F.A., 1818b. Régénération de la nature ou recherches sur les moyens de recréer dans tous les climats, les anciennes températures et l'ordre primitif des saisons, par des plantations raisonnées., 2. Didot l'aîné, Paris, 398 pp.
137. Reclus, E., 1869. Histoire d'un ruisseau. Babel, Paris, 206 pp.
138. Refsgaard, J.C., Alley, W.M. et Vuglinsky, V.S., 1989. Methodology for distinguishing between man's influence and climatic effects on the hydrological cycle. IHP-III Project 6.3, UNESCO, Paris.
139. Richard, D. et Mathys, N., 1999. Historique, contexte technique et scientifique des BVRE de Draix. Caractéristiques, données disponibles et principaux résultats acquis au cours de dix ans de suivi. In: N. Mathys (Editor), Les bassins versants expérimentaux de Draix, laboratoire d'étude de l'érosion en montagne. Cemagref, Antony, pp. 11-28.
140. Roberts, S., Vertessy, R.A. et Grayson, R.B., 2001. Transpiration from *Eucalyptus sieberi* (L. Johnson) forests of different age. *Forest Ecology and Management*, 143: 153-161.
141. Rodda, J.C., 1967. The rainfall measurement problem, IASH General assembly. IASH, Bern, pp. 215-231.
142. Rodda, J.C., 1970. On the questions of rainfall measurement and representativeness, Symposium on world water balance. IASH-Unesco, Reading, pp. 173-186.
143. Rodriguez-Iturbe, I. et Mejia, J.M., 1974a. The design of rainfall networks in time and space. *Water Resources Research*, 10(4): 713-728.

Références bibliographiques

144. Rodriguez-Iturbe, I. et Mejia, J.M., 1974b. On the transformation of point rainfall to areal rainfall. *Water Resources Research*, 10(4): 729-735.
145. Rougier de la Bergerie, F., 1800 (an IX). Mémoire et observations sur les abus de défrichements et la destruction des bois et forêts. Librairie François Fournier, Auxerre, 76 pp.
146. Salas, J.D., 1993. Analysis and modeling of hydrologic time series, ch. 19. In: D.R. Maidment (Editor), *Handbook of hydrology*. McGraw-Hill, New-York.
147. Schreider, S.Y. et al., 2002. Detecting changes in streamflow response to changes in non-climatic catchment conditions: farm dam development in the Murray-Darling basin, Australia. *Journal of Hydrology*, 262(1-4): 84-98.
148. Scott, D.F. et Lesch, W., 1997. Streamflow responses to afforestation with *Eucalyptus grandis* and *Pinus patula* and to felling in the Mokobulaan experimental catchments, South Africa. *Journal of Hydrology*, 199: 360-377.
149. Seed, A.W. et Austin, G.L., 1990. Sampling errors for raingauge-derived mean areal daily and monthly rainfall. *Journal of Hydrology*, 118: 163-173.
150. Shuttleworth, W.J., 1993. Evaporation. In: D.R. Maidment (Editor), *Handbook of hydrology*. McGraw-Hill, New-York.
151. Stol, P.T., 1972. The relative efficiency of the density of rain-gage networks. *Journal of Hydrology*, 15: 193-208.
152. Storm, B., Høgh Jensen, K. et Refsgaard, J.C., 1989. Estimation of catchment rainfall uncertainty and its influence on runoff prediction. *Nordic Hydrology*, 19: 77-88.
153. Sugawara, M., 1993. On the weights of precipitation stations. In: J.P. O'Kane (Editor), *Advances in theoretical hydrology*. Elsevier, Amsterdam, pp. 59-74.
154. Sugawara, M., 1995. Tank model. In: V.P. Singh (Editor), *Computer models of watershed hydrology*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO., pp. 165-214.
155. Surell, A., 1841. Etude sur les torrents des Hautes Alpes. Carilian-Goeury et Victor Dalmont, Paris, 283 pp.
156. Sutcliffe, J.V., 1966. The assessment of random errors in areal rainfall estimation. *Bulletin of IASH*, 11(3): 35-42.
157. Swank, W.T., Swift, L.W. et Douglass, J.E., 1988. Streamflow changes associated with forest cutting, species conversions, and natural disturbances. In: W.T. Swank et D.A. Crossley (Editors), *Forest hydrology and ecology at Coweeta*. Springer-Verlag, New York.
158. Tabios, G.Q. et Salas, J.D., 1985. A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation. *Water Resources Bulletin*, 31(3): 365-380.
159. Trimble, G.R.J., Reinhart, K.G. et Webster, H.H., 1963. Cutting the forest to increase water yields. *Journal of Forestry*, 61: 635-640.
160. Troendle, C.A. et King, R.M., 1985. The effect of timber harvest on the Fool creek watershed, 30 years later. *Water Resources Research*, 21(12): 1915-1922.
161. Troutman, B.M., 1982. An analysis of input errors in precipitation-runoff models using regression with errors in the independent variables. *Water Resources Research*, 18(4): 947-964.

162. Troutman, B.M., 1983. Runoff prediction errors and bias in parameter estimation induced by spatial variability of precipitation. *Water Resources Research*, 19(3): 791-810.
163. Vallès, F., 1857. Etudes sur les inondations, leurs causes et leurs effets. Victor Dalmont, Paris, 528 pp.
164. Vallès, F., 1862. Etudes expérimentales sur les inondations. *Annales des Ponts et Chaussées*(33): 177-210.
165. Vallès, F., 1865. De l'aliénation des forêts aux points de vue gouvernemental, financier, climatologique et hydrologique. Dunod, Paris, 184 pp.
166. Van der Zel, D.W. et Kruger, F.J., 1975. Results of the multiple catchment experiments at the Jonkershoek research station, South Africa. 2. Influence of protection of fynbos on stream discharge in Langrivier. *Forestry in South Africa*(16): 13-18.
167. Vertessy, R.A., Benyon, R.G., O'Sullivan, S.K. et Gribben, P.R., 1995. Relationships between stem diameter, sapwood area, leaf area and transpiration in a young mountain ash forest. *Tree Physiology*, 15: 559-567.
168. Vertessy, R.A., Hatton, T.J., Reece, P., OSullivan, S.K. et Benyon, R.G., 1997. Estimating stand water use of large mountain ash trees and validation of the sap flow measurement technique. *Tree Physiology*, 17(12): 747-756.
169. Vertessy, R.A., Watson, F. et O'Sullivan, S.K., 2001. Factors determining relations between stand age and catchment water balance in mountain ash forests. *Forest Ecology and Management*, 143: 13-26.
170. Voskanian, A.E. et Sarkissian, V.H., 1995. Hydrologie et hydrométrie (*en arménien*). Louys, Yerevan, 359 pp.
171. Wheeler, H.S., Jakeman, A.J. et Beven, K.J., 1993. Progress and directions in rainfall-runoff modelling - Chapter 5. In: A.J. Jakeman, M.B. Beck et M.J. McAleer (Editors), *Modelling change in environmental systems*. John Wiley & sons, Chichester, pp. 101-132.
172. Wilson, C.B., Valdes, J.B. et Rodriguez-Iturbe, I., 1979. On the influence of the spatial distribution of rainfall on storm runoff. *Water Resources Research*, 15(2): 321-328.
173. Zawadzki, I.I., 1973. Errors and fluctuations of raingauge estimates of areal rainfall. *Journal of Hydrology*, 18: 243-255.

Table des matières

<i>Résumé</i>	3
<i>Abstract</i>	5
<i>Remerciements</i>	7
<i>Avant Propos</i>	13
<i>Introduction</i>	15
<i>Partie I - Eaux et Forêts : de la controverse historique au débat scientifique</i>	19
1 Histoire des idées sur le lien entre Eaux et Forêts	21
1.1 Origine des croyances relatives à l'effet de la forêt sur le climat et le débit des rivières.....	21
1.2 Evolution des idées aux 18 ^{ème} et 19 ^{ème} siècle	22
1.2.1 Le Parti des Forestiers	23
1.2.2 Le Parti des Ingénieurs	34
1.2.3 Débat entre les deux factions au long du 19 ^{ème} siècle.....	39
1.2.4 Le débat en France vu de l'étranger.....	42
1.3 Etat actuel de l'opinion publique	44
2 Une revue de la littérature scientifique du vingtième siècle	47
2.1 Les débuts des bassins versants expérimentaux.....	47
2.2 Invention de l'approche des bassins versants appariés à Wagon Wheel Gap.....	47
2.3 L'apport des expérimentations utilisant des bassins versants appariés.....	48
2.3.1 Rappel des principes de la méthode.....	48
2.3.2 Synthèse des données rassemblées dans la littérature.....	50
2.3.3 Forêt et écoulement annuel (rendement en eau du bassin versant).....	52
2.3.4 Impact sur les crues	59
2.3.5 Impact sur les étiages	61
2.3.6 Impact sur la répartition temporelle des écoulements.....	62

Table des matières

2.4	Synthèse des résultats obtenus sur les bassins versants appariés : impact de la forêt sur le comportement hydrologique d'un bassin versant.....	62
2.5	Besoins de recherche	64
Conclusion de la Première Partie		66
 <i>Partie II - Comment identifier les modifications du comportement hydrologique liées à l'évolution du couvert forestier ?.....</i>		
3 Constitution d'un échantillon de bassins versants.....69		
3.1	Le Massif central, zone d'étude privilégiée	69
3.2	Echantillon d'étude.....	71
3.2.1	Critères de choix de l'échantillon	71
3.2.2	Critique de l'échantillon : réduction à 63 bassins versants.....	71
3.2.3	Sous-ensemble de 34 bassins versants dont on connaît l'évolution du couvert forestier	72
3.2.4	Présentation de l'échantillon d'étude	73
3.3	Constitution de la base de données de pluies et de débits	78
3.4	Conclusion du chapitre 3.....	80
 4 Etude du comportement hydrologique des bassins versants83		
4.1	Qu'est-ce que le comportement d'un bassin versant?	83
4.2	Comment peut-on décrire le comportement d'un bassin versant ?	84
4.2.1	Les modèles «boîte noire»	85
4.2.2	Les modèles à réservoir (conceptuels et empiriques).....	85
4.2.3	Les modèles fondés sur la physique	87
4.2.4	Y a-t-il des raisons philosophiques pour écarter les modèles empiriques au profit des modèles conceptuels et fondés sur la physique ?	88
4.2.5	Quelles sont les possibilités offertes par chacune des classes de modèles pour l'analyse de notre échantillon de bassins versants ?	89
4.3	Sélection d'un modèle pluie-débit adapté à notre problématique	90
 Conclusion de la Deuxième Partie		93
 <i>Partie III - Questions de modélisation hydrologique.....</i>		
5 Impact de la mauvaise connaissance de la pluie97		
5.1	Importance de la donnée de pluie en modélisation pluie-débit : peut-on connaître la pluie qui s'abat sur un bassin versant ? Comment évaluer la sensibilité d'un modèle à une mauvaise connaissance de la pluie ?.....	98
5.2	Etude empirique de l'impact d'une connaissance imparfaite de la pluie sur un échantillon de trois bassins versants	100
5.2.1	Présentation des indices GORE et BALANCE	101
5.2.2	Présentation des bassins versants utilisés	102
5.2.3	Plan d'expérience.....	103

5.2.4	Sensibilité des performances du modèle à la qualité de l'estimation des pluies	106
5.2.5	Sensibilité des paramètres du modèle à la qualité de l'estimation des pluies	108
5.3	Que faire en présence d'une estimation biaisée de la pluie de bassin ? Méthodes de correction globale de la pluie.	112
5.3.1	Utilisation de cartes de la pluviométrie moyenne interannuelle.....	112
5.3.2	Utilisation d'un modèle pluie-débit fonctionnant à un pas de temps plus large.....	115
5.3.3	Comparaison des méthodes en termes de performance d'un modèle pluie-débit journalier.....	117
5.3.4	Impact du mode de correction de la pluie sur les paramètres de GR4J	119
5.3.5	Intérêt comparatif d'une correction de la pluie pour GR4J et TOPMO	123
5.4	Conclusion : Peut-on corriger la pluie ? Faut-il corriger la pluie ?.....	124
6	Sensibilité du modèle pluie-débit à la variabilité spatiale de l'Evapotranspiration Potentielle (ETP).....	127
6.1	L'ETP, composante déterminante du bilan en eau d'un bassin.....	127
6.2	Utilisation de l'ETP dans les modèles pluie-débit	128
6.3	Régionalisation de l'ETP moyenne annuelle et mensuelle dans le Massif central	130
6.4	Caractérisation des variations inter-annuelles de l'ETP	136
6.5	Impact du mode de calcul de l'ETP sur la performance des modèles pluie-débit	140
6.6	Impact du mode de calcul de l'ETP sur les paramètres de GR4J.....	142
6.7	Conclusion et pistes de recherches supplémentaires	146
	Conclusion de la Troisième Partie	147
	<i>Partie IV - Des indicateurs globaux pour décrire le couvert forestier et son évolution à l'échelle du bassin versant</i>	<i>151</i>
7	Comment caractériser l'évolution de l'occupation des sols ?.....	153
7.1	Données cartographiques et dendrométriques acquises par l'IFN	153
7.1.1	Base géographique de l'inventaire	153
7.1.2	Déroulement de l'inventaire	154
7.1.3	Périodicité de l'inventaire.....	155
7.1.4	Organisation administrative de l'inventaire.....	156
7.1.5	Disponibilité des données	157
7.2	Méthodologie retenue pour utiliser les données de l'IFN.....	158
7.2.1	Cartographie des peuplements par bassin versant.....	158
7.2.2	Réalisation pratique de l'interprétation.....	160

7.2.3	Choix de descripteurs dendrométriques potentiellement pertinents pour l'hydrologie.....	160
7.2.4	La base de données dendrométriques de l'IFN.....	162
7.3	Conclusion sur la méthodologie et les bases de données exploitées	163
8	Obtention d'indices globaux d'évolution du couvert forestier a l'échelle d'un bassin versant.....	165
8.1	Génération d'un indicateur global	165
8.2	Analyse de l'évolution des paramètres dendrométriques sur 25 régions forestières départementales du Massif central.....	166
8.3	Analyse de l'évolution des surfaces forestières sur 34 bassins versants du Massif central	167
8.4	Analyse de l'évolution des paramètres d'évolution du couvert forestier sur notre échantillon de bassins versants	169
8.5	Conclusion sur les descripteurs globaux d'évolution du couvert forestier	172
	Conclusion de la Quatrième Partie	173
	<i>Partie V - Identification de tendances au sein du comportement hydrologique des bassins versants</i>	<i>175</i>
9	Détection de non-stationnarités dans le comportement des bassins versants	176
9.1	Fondements des méthodes d'identification des non-stationnarités dans le comportement d'un bassin versant	176
9.1.1	Méthodes utilisant un modèle numérique de bassin versant fondé sur une représentation explicite des phénomènes physiques mis en jeu	176
9.1.2	Méthodes d'analyse utilisant un bassin de référence	176
9.1.3	Méthodes d'analyse avec simulation d'un bassin de référence	176
9.2	Exemples de méthodes proposées dans la littérature	178
9.2.1	Revue des méthodologies proposées pour l'utilisation d'un modèle pluie-débit pour la détection de changements du comportement des bassins versants	178
9.2.2	Présentation de la méthode des simulations croisées, adoptée pour notre recherche.....	181
9.3	Choix de variables hydrologiques représentatives du comportement du bassin versant	182
9.4	Mise au point d'hypothèses permettant l'évaluation des tableaux de simulations croisées.....	183
9.4.1	Test utilisant le signe des évolutions	184
9.4.2	Test conditionnel fondé sur les permutations des tableaux de simulations croisées.....	188
9.5	Mise au point d'un troisième test permettant de prendre en compte l'incertitude sur les paramètres lors du calage des modèles.....	190
9.5.1	Pourquoi un test supplémentaire ?	190
9.5.2	Etude des places respectives des distributions de probabilité.....	190

9.5.3	Une statistique traduisant la place respective de modèles.....	192
9.5.4	Simulation des situations équiprobables sous H0	193
9.6	Conclusion du chapitre 9.....	193
10	Des cas d'école célèbres pour valider les tests de détection des tendances ...	195
10.1	On retrouve la trace d'un changement progressif sur le Bassin Versant Expérimental de Coshocton	195
10.1.1	Un bassin expérimental suivi depuis plus de 60 ans.....	195
10.1.2	Le reboisement est suivi d'un changement progressif du comportement hydrologique	195
10.1.3	Le comportement hydrologique se stabilise après une trentaine d'années sous couvert forestier	197
10.1.4	Les tests statistiques sont mis en difficultés sur des périodes hétérogènes.....	198
10.1.5	Des tendances de long terme surprenantes	198
10.2	Sur le bassin versant expérimental de Three Bar, on détecte certaines tendances brusques	200
10.2.1	Des bassins soumis à un changement brusque: incendie puis éradication du maquis	200
10.3	Sur le bassin versant de recherche du Réal Collobrier, on parvient à détecter les changements brusques liés à l'incendie, et on identifie une évolution lente insoupçonnée.....	203
10.3.1	Le Rimbaud, un bassin versant incendié en 1990	203
10.3.2	Vaubarnier et Valescure: deux bassins épargnés par l'incendie de 1990... se révèlent eux-aussi non-stationnaires.....	206
10.3.3	Conclusion sur les sous-bassins du Réal Collobrier	210
10.4	Le bassin versant de référence (BV2) d'Andrews Experimental Forest est stable, sauf pour l'écoulement de base	210
10.5	Impact du nombre de périodes sur la puissance du test de détection de tendances.....	212
10.5.1	Cas d'évolution progressive (Coshocton)	212
10.5.2	Cas d'évolution brutale (Rimbaud).....	215
10.6	Conclusion du chapitre 10.....	216
	Conclusion de la cinquième Partie.....	217
	<i>Partie VI - Le couvert forestier peut-il expliquer la non-stationnarité des bassins versants du Massif central?</i>	<i>219</i>
11	Application des tests de détection de non-stationnarité à l'échantillon de 63 bassins versants du Massif central.....	221
11.1	Synthèse des résultats dans le Massif central	221
11.2	Certains bassins présentent-ils des non-stationnarités trop complexes pour être identifiées par nos tests ?	222
11.2.1	Typologie des non-stationnarités « complexes »	222
11.2.2	Inventaire des situations complexes	225

Table des matières

11.3	Analyse de quelques cas particuliers d'évolution dans le Massif central ...	225
11.4	Conclusion du Chapitre 11.....	228
12	Peut-on lier les tendances hydrologiques et forestières dans le Massif central ?	229
12.1	Y a-t-il un lien entre le caractère non-stationnaire d'un bassin et l'évolution de son couvert forestier ?.....	229
12.1.1	Utilisation des tableaux de simulations croisées pour définir un indice normé d'évolution du comportement hydrologique permettant la comparaison de l'amplitude des changements entre bassins	229
12.1.2	Analyse graphique du lien entre évolution hydrologique et évolution forestière.....	230
12.1.3	Conclusion sur la méthode employée pour comparer les matrices de simulations croisées et l'évolution forestière.....	235
12.2	Une approche alternative permettant d'exploiter les couples (descripteurs hydrologiques, descripteurs forestiers).....	235
12.2.1	Principe de la méthode	235
12.2.2	Examen graphique du lien entre la Réponse Hydrologique Potentielle (RHP) et le couvert forestier.....	236
12.2.3	Synthèse	241
12.3	Le couvert forestier aurait-il un rôle modérateur sur la variabilité de l'écoulement total et de l'écoulement en crue?.....	242
12.4	Conclusion du chapitre 12.....	245
	Conclusion de la sixième Partie.....	246
	<i>Conclusion générale</i>	<i>247</i>
	<i>Références bibliographiques.....</i>	<i>253</i>
	<i>Table des matières</i>	<i>263</i>
	<i>Table des figures.....</i>	<i>269</i>
	<i>Liste des tableaux</i>	<i>274</i>

Table des figures

Figure 0.1 : Niveau potentiel d'utilisation (consommation) des ressources en eau en 2025 (d'après Andréassian and Margat, 1997).....	16
Figure 2.1 : méthode des bassins versants appariés - calage d'une relation entre les bassins au cours de la période précédant le traitement (d'après Hewlett, 1982) .	49
Figure 2.2 : méthode des bassins versants appariés - évaluation de l'effet du traitement grâce à la relation calée avant son application (d'après Hewlett, 1982)	49
Figure 2.3 : pluie moyenne annuelle et débit moyen annuel (avant traitement) des bassins rassemblés dans la littérature hydrologique.....	51
Figure 2.4 : répartition des bassins versants rassemblés dans la littérature selon le type de couverture végétale.....	51
Figure 2.5 : distribution des surfaces des bassins versants rassemblés dans la littérature hydrologique.....	52
Figure 2.6 : variation maximale du débit annuel (exprimée en lame d'eau équivalente) suite au traitement en fonction de la proportion des bassins versants traités (données issues de la littérature hydrologique).....	53
Figure 2.7 : variation maximale du débit annuel (exprimée en pourcentage de la moyenne annuelle des pluies) suite au traitement en fonction de la proportion des bassins versants traités (données issues de la littérature hydrologique)	53
Figure 2.8 : Différentes réponses à la conversion d'un bassin versant forestier en fonction de la pluie de l'année considérée (d'après Hibbert et al., 1975).....	54
Figure 2.9 : exemples d'évolution du comportement hydrologique des bassins versants après traitement (d'après les données de Hornbeck et al., 1993)	56
Figure 2.10 : estimation de l'évolution du bilan en eau de peuplements d'Eucalyptus regnans dans le BV de Maroondah, Australie pour une pluie moyenne annuelle de 1800 mm (d'après Vertessy et al., 2001)	58
Figure 2.11 : variations annuelles de trois paramètres de l'écoulement en crue suite à la coupe de 40% du bassin versant de Fool Creek (d'après Troendle et King, 1985).....	60
Figure 3.1 : Taux de boisement par département en 1998 (Source : IFN).....	69
Figure 3.2 : Evolution de la densité et de l'étendue des peuplements, vue sous l'angle du volume sur pied (Source : IFN).....	70

Table des figures

Figure 3.3 : Localisation des bassins étudiés.....	76
Figure 3.4 : répartition des tailles des bassins versants de notre échantillon (pour l'échantillon total, moyenne : 45 km ² , médiane : 46 km ² , écart type : 22 km ²).....	77
Figure 3.5 : répartition des altitudes moyennes des bassins versants de notre échantillon.....	78
Figure 3.6 : distribution des altitudes des postes pluviométriques et des bassins versants (discrétisés par mailles de 1 km ²)	80
Figure 4.1 : distribution des résultats au calage des trois modèles comparés	91
Figure 4.2 : distribution des résultats au contrôle des trois modèles comparés.....	92
Figure 5.1 : situation des bassins versants tests et de leur réseau pluviométrique....	102
Figure 5.2 : hydrogrammes journaliers de l'Yonne, du Serein et du Réal Collobrier sur la période d'étude	105
Figure 5.3 : Évolution de la performance au calage de GR3J en fonction des indices GORE (a) et BILAN (b) pour trois bassins versants (calage sur deux périodes : 1980-84 et 1985-1989 pour l'Yonne et le Serein, 1973-77 et 1978-82 pour le Réal Collobrier).....	107
Figure 5.4 : relation entre la qualité d'estimation de la pluie (mesurée par les indices GORE (a) et BILAN (b)) et les valeurs des trois paramètres de GR3J. Résultats obtenus sur l'Yonne, calage sur la période 1980-84.	109
Figure 5.5 : relation entre la qualité d'estimation de la pluie (mesurée par les indices GORE (a) et BILAN (b)) et les valeurs des trois paramètres de GR3J. Résultats obtenus sur le Serein, calage sur la période 1980-84.....	110
Figure 5.6 : relation entre la qualité d'estimation de la pluie (mesurée par les indices GORE (a) et BILAN (b)) et les valeurs des trois paramètres de GR3J. Résultats obtenus sur le Réal Collobrier, calage sur la période 1973-77.....	111
Figure 5.7 : relief et moyennes annuelles 1961-1990 des précipitations dans le Massif central (source : Météo France).....	114
Figure 5.8 : résultats de l'optimisation d'un coefficient correcteur de la pluie avec GR1A et du calcul d'un coefficient lissé.....	116
Figure 5.9 : distribution des coefficients multiplicatifs correcteurs de la pluie calculée par les trois méthodes présentées.....	116
Figure 5.10 : distribution des résultats de GR4J au contrôle selon les modalités de correction des pluies utilisées (Nash calculé sur les racines des débits, bassins 44 et 45 omis)	118
Figure 5.11 : distribution des résultats de GR4J au contrôle selon les modalités de correction des pluies utilisées (Nash calculé sur les débits, bassins 44 et 45 omis)	118
Figure 5.12 : comparaison des différentes méthodes de correction de la pluie en termes de distribution des valeurs calées du paramètre d'échange (X3) de GR4J	121
Figure 5.13 : comparaison des différentes méthodes de correction de la pluie en termes de distribution des valeurs calées de la capacité du réservoir sol (X2) de GR4J	121
Figure 5.14 : comparaison des différentes méthodes de correction de la pluie en termes de distribution des valeurs calées de la capacité du réservoir de routage (X1) de GR4J	122

Table des figures

Figure 5.15 : comparaison des différentes méthodes de correction de la pluie en termes de distribution des valeurs calées du temps de base de l'hydrogramme unitaire de routage (X4) de GR4J.....	122
Figure 5.16 : distribution des résultats de TOPMO au contrôle selon les modalités de correction des pluies utilisées (Nash calculé sur les racines carrées des débits, bassins 44 et 45 omis)	123
Figure 5.17 : distribution des résultats de TOPMO au contrôle selon les modalités de correction des pluies utilisées (Nash calculé sur les débits, bassins 44 et 45 omis)	124
Figure 6.1 : Localisation des postes d'ETP utilisées dans ce chapitre	131
Figure 6.2 : évolution de l'ETP moyenne annuelle de Penman-Monteith dans le Massif central	132
Figure 6.3 : exemples de variation mensuelle de l'ETP et de son calcul par les formules régionales pour Clermont-Ferrand (a), Montélimar (b) et le Mont Aigoual (c).....	136
Figure 6.4 : évolution de l'ETP annuelle en 15 postes du Massif central.....	137
Figure 6.5 : évolution relative de l'ETP annuelle en 15 postes du Massif central, et comportement de l'indice régional annuel d'ETP (RAETP) (note : l'échelle de ce dernier est décalé).....	138
Figure 6.6 : comparaison des différentes méthodes de calcul de l'ETP en termes de distribution des résultats de GR4J au contrôle (plus une distribution se porte vers la droite, meilleure elle est).....	142
Figure 6.7 : comparaison des différentes méthodes de calcul de l'ETP en termes de distribution des valeurs calées du paramètre d'échange (X3) de GR4J.....	143
Figure 6.8 : comparaison des différentes méthodes de calcul de l'ETP en termes de distribution des valeurs calées de la capacité du réservoir sol (X2) de GR4J	143
Figure 6.9 : comparaison des différentes méthodes de calcul de l'ETP en termes de distribution des valeurs calées de la capacité du réservoir de routage (X1) de GR4J	144
Figure 6.10 : comparaison des différentes méthodes de calcul de l'ETP en termes de distribution des valeurs calées de la base de temps de l'hydrogramme unitaire de routage de GR4J (paramètre X4)	144
Figure 7.1 : découpage de la France en 309 régions forestières par l'IFN (source : IFN)	154
Figure 7.2 : schéma simplifié des opérations d'inventaire forestier (source : IFN)....	155
Figure 7.3 : répartition des départements entre les 5 échelons de l'IFN.....	157
Figure 7.4 : méthode de photo-interprétation régressive du couvert forestier.....	159
Figure 8.1 : croisement de données cartographiques et dendrométriques pour obtenir un indice global d'évolution du couvert forestier.....	165
Figure 8.2 : évolution du volume sur pied à l'hectare dans les trois types de couvert forestier dense (moyenne sur 25 RegD du Massif central)	166
Figure 8.3 : évolution de l'accroissement annuel dans les trois types de couvert forestier dense (moyenne sur 25 RegD du Massif central)	166
Figure 8.4 : évolution de la surface terrière à l'hectare dans les trois types de couvert forestier dense (moyenne sur 25 RegD du Massif central)	167

Table des figures

Figure 8.5 : évolution des pourcentages de bassin versant occupés par un type de couvert (A : agriculture, L : lande, FO : forêt ouverte, F : autres types forestiers)	168
Figure 8.6 : évolution du couvert forestier dense en fonction du couvert initial pour l'échantillon de 34 bassins versants du Massif central.....	169
Figure 8.7 : évolution des paramètres dendrométriques au cours du temps (valeur moyenne pour les 34 bassins versants étudiés).....	170
Figure 8.8 : lien entre deux descripteurs dendrométriques à l'échelle du bassin versant (ACC et G) pour les 34 bassins versants de notre échantillon (◆ : cycle 1, ▲ : cycle 2, ● : cycle 3)	171
Figure 8.9 : lien entre deux descripteurs dendrométriques à l'échelle du bassin versant (VOL et G) pour les 34 bassins versants de notre échantillon (◆ : cycle 1, ▲ : cycle 2, ● : cycle 3)	171
Figure 8.10 : lien entre deux descripteurs dendrométriques à l'échelle du bassin versant (ACC et VOL) pour les 34 bassins versants de notre échantillon (◆ : cycle 1, ▲ : cycle 2, ● : cycle 3)	172
Figure 9.1 : hydrogramme présentant les lames d'eau correspondant à chacune des variables hydrologiques retenues. Les deux lignes rouges représentent respectivement les seuils retenus pour définir les crues (quatre fois le module) et les étiages (un quart du module).....	183
Figure 9.2 : abaque permettant le calcul de la « p-valeur » α' (exprimée en %) : risque pris en rejetant H_0 , en fonction du nombre d'éléments dans le groupe ('+' ou '-') le moins représenté (chaque courbe correspond à une valeur de n, n ² correspondant à la dimension de la matrice testée)	187
Figure 9.3 : distribution empirique des 288 valeurs de la statistique SDD (Somme des Différences par rapport à la Diagonale) obtenues pour la Matrice 2 de notre exemple (les lignes pointillées désignent le domaine des valeurs « extrêmes », à 5 et 95%)	189
Figure 9.4 : représentation des distributions caractéristiques des modèles.....	191
Figure 9.5 : analyse de deux situations types utilisant les densités de probabilité ou les fonctions de répartition des modèles.....	191
Figure 10.1 : évolution du risque de première espèce α' , sur différentes périodes totales de calcul du test (incluant ou non l'incendie de 1990), pour les trois sous-bassins du Réal Collobrier.....	209
Figure 10.2 : évolution du risque de première espèce α' , selon la longueur (et donc le nombre) des périodes de calage du modèle pluie-débit, pour le bassin du Rimbaud, pour les périodes 1968-1996 et 1968-1999 (date de l'incendie : 1990).215	
Figure 11.1 : tableau de simulations croisées où une période de stabilité est suivie d'une période de non-stationnarité (BV A, variable cible : écoulement en étiage)	223
Figure 11.2 : tableau de simulations croisées où co-existent deux tendances successives (BV P, variable cible : écoulement total).....	224
Figure 11.3 : tableau de simulations croisées où on reconnaît un décrochement brusque (BV P, variable cible : écoulement en étiage).....	224
Figure 12.1 : graphiques explorant le lien entre l'évolution de l'écoulement total et (a) l'évolution de la surface terrière, (b) la surface terrière du bassin (valeur	

Table des figures

moyenne des trois cycles) pour 34 bassins du massif Central (les carrés roses correspondent aux tendances « complexes » recensées au Tableau 11.3)	231
Figure 12.2 : graphiques explorant le lien entre l'indice normé d'évolution de l'écoulement en crue et (a) l'indice d'évolution de la surface terrière, (b) la surface terrière du bassin (valeur moyenne des trois cycles) pour 34 bassins du massif Central (les carrés roses correspondent aux tendances « complexes » recensées au Tableau 11.3)	232
Figure 12.3 : graphiques explorant le lien entre l'indice normé d'évolution du déficit d'écoulement en étiage et (a) l'indice d'évolution de la surface terrière, (b) la surface terrière du bassin (valeur moyenne des trois cycles) pour 34 bassins du massif Central (les carrés roses correspondent aux tendances « complexes » recensées au Tableau 11.3).....	233
Figure 12.4 : graphiques explorant le lien entre l'indice normé d'évolution de l'écoulement de base et (a) l'indice d'évolution de la surface terrière, (b) la surface terrière du bassin (valeur moyenne des trois cycles) pour 34 bassins du massif Central (les carrés roses correspondent aux tendances « complexes » recensées au Tableau 11.3).....	234
Figure 12.5 : méthode utilisée pour mettre en relation le couvert forestier et le comportement hydrologique (RHP) du bassin versant	236
Figure 12.6 : corrélation existante entre l'évolution de l'écoulement total et l'évolution du couvert forestier pour 34 bassins versants du Massif central.....	237
Figure 12.7 : corrélation existante entre l'évolution de l'écoulement en crue et l'évolution du couvert forestier pour 34 bassins versants du Massif central	239
Figure 12.8 : corrélation existante entre l'évolution du déficit d'écoulement en étiage et l'évolution du couvert forestier pour 34 bassins versants du Massif central .	240
Figure 12.9 : corrélation existante entre l'évolution de l'écoulement de base et l'évolution du couvert forestier pour 34 bassins versants du Massif central	241
Figure 12.10 : suivi bassin par bassin de la corrélation entre l'évolution de l'écoulement et l'altitude moyenne du bassin.....	243
Figure 12.11 : suivi bassin par bassin de la corrélation entre l'évolution de l'écoulement et la pluviométrie moyenne du bassin.....	244

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : observations sur l'effet du déboisement sur les crues pour des bassins versants appariés	59
Tableau 3.1 : Liste des 63 bassins versants de l'échantillon d'étude complet (les 34 bassins versants pour lesquels des données d'évolution forestière existent sont notés par une *)	73
Tableau 3.2 : distribution des bassins versants de l'échantillon par département.....	76
Tableau 3.3 : distribution des bassins versants de l'échantillon par Agence de l'Eau	76
Tableau 3.4 : caractéristiques de la base de données hydro-météorologiques des 63 bassins versants de notre échantillon (note : l'ETP ne figure pas dans ce tableau, dans la mesure où nous n'utilisons que des valeurs moyennes inter-annuelles ; la base de données disponible pour l'ETP est présentée en détail au chapitre 6.) ...	79
Tableau 4.1 : différents types de classifications utilisées pour les modèles pluie-débit	84
Tableau 5.1 : caractéristiques des trois bassins utilisés pour l'étude de l'impact d'une connaissance imparfaite de la pluie sur la performance d'un modèle pluie-débit	103
Tableau 6.1 : Caractéristiques de l'ETP (Penman-Monteith) en 15 postes du réseau synoptique du Massif central.....	129
Tableau 6.2 : Liste des 42 stations utilisées pour la régionalisation de l'ETP dans le Massif central	130
Tableau 6.3 : résultats de la régression linéaire de l'Eq. 6.2.....	132
Tableau 6.4 : résultats des régressions linéaires permettant de calculer l'ETP moyenne mensuelle (Eq. 6.3).....	133
Tableau 6.5 : paramètres du développement limité en série de Fourier (Eq. 6.4) pour le calcul de l'ETP mensuelle dans le Massif central.....	134
Tableau 6.6 : corrélation existant entre l'indice régional annuel d'ETP (RAETP) et l'indice local pour les 15 stations de longue durée	138
Tableau 6.7 : résultats de contrôle de validité pour l'indice RAETP sur 8 postes n'ayant pas servi à son calcul.....	139

Liste des tableaux

Tableau 6.8 : Caractéristiques des sept modes de calcul de l'ETP qui ont servi à tester les performances de GR4J.....	140
Tableau 6.9 : performance moyenne de GR4J en contrôle selon le mode de calcul de l'ETP, sur l'échantillon de 63 bassins versants (126 périodes de contrôle)	141
Tableau 6.10 : comparaison des performances du mode 4 et des autres modes de calcul de l'ETP	141
Tableau 7.1 : dates de réalisation des trois inventaires forestiers dans les départements du Massif central (date des photographies)	156
Tableau 7.2 : Disponibilité des données forestières de l'Inventaire Forestier National pour l'analyse de l'évolution du couvert forestier	157
Tableau 8.1 : évolution des paramètres dendrométriques et de deux paramètres de surface au cours du temps (valeurs moyenne, minimale et maximale sur l'échantillon des 34 bassins versants concernés).....	169
Tableau 9.1 : Tableaux des simulations croisées pour l'étude de l'évolution du comportement hydrologique d'un bassin versant	181
Tableau 9.2 : trois différents types de tableaux de simulations croisées théoriques .	182
Tableau 9.3 : tableau récapitulatif des places respectives des distributions	192
Tableau 10.1 : les matrices de simulation croisées pour le bassin 172 de Coshocton sur la période 1938-1967 (couvert forestier en croissance) indiquent une probable non-stationnarité.....	196
Tableau 10.2 : les matrices de simulation croisées pour le bassin 172 de Coshocton sur la période 1976-1999 (couvert forestier stabilisé) ne laissent plus apparaître aucun changement.....	197
Tableau 10.3 : matrices de simulation croisées pour le bassin 172 de Coshocton sur la totalité de la période disponible	198
Tableau 10.4 : matrices de simulations croisées pour un bassin de référence à Coshocton (bassin 196) sur la totalité de la période disponible.....	200
Tableau 10.5 : récapitulatif des traitements subis par les bassins versants expérimentaux de Three Bar	201
Tableau 10.6 : interprétation des matrices de simulation croisées pour le bassin Three Bar C - incendie puis conversion du maquis en pâturage	201
Tableau 10.7 : interprétation des matrices de simulation croisées pour le bassin Three Bar D - incendie puis retour progressif à l'état de maquis	202
Tableau 10.8 : interprétation des matrices de simulation croisées pour le bassin du Rimbaud (BVRE du Réal Collobrier)- incendie en 1990.....	204
Tableau 10.9 : tableau normé des simulations croisées pour le bassin versant du Rimbaud (incendié en 1990).....	205
Tableau 10.10 : tests de non-stationnarité pour le bassin du Rimbaud (BVRE du Réal Collobrier) sur différentes périodes, incluant ou non l'incendie de 1990	205
Tableau 10.11 : interprétation des matrices de simulation croisées pour le bassin du Vaubarnier (BVRE du Réal Collobrier)- épargné par l'incendie de 1990	207
Tableau 10.12 : interprétation des matrices de simulation croisées pour le bassin du Valescure (BVRE du Réal Collobrier)- épargné par l'incendie de 1990	208
Tableau 10.13 : interprétation des matrices de simulation croisées pour le bassin n°2 d'Andrews Exp. Forest- bassin de référence couvert par une forêt « ancienne »	211

Tableau 10.14 : tableaux de simulations croisées obtenus pour l'écoulement total sur le bassin 172 de Coshocton, pour différentes durées de calage, pendant la période de non-stationnarité présumée (« n ans » signifie une année d'initialisation plus n années de calage).....	213
Tableau 10.15 : tableaux de simulations croisées obtenus pour l'écoulement total sur le bassin 172 de Coshocton, pour différentes durées de calage, pendant la période 1976-99 (stationnarité présumée).....	214
Tableau 11.1 : résultats de la recherche des non-stationnarités dans les bassins versants du Massif central (statistiques calculées sur 63 bassins versants au total)	221
Tableau 11.2 : répartition par signe des bassins versants identifiés comme non-stationnaires (p value < 5%) par le test 2 (test des permutations sur les tableaux croisés, α')	222
Tableau 11.3 : cas de tendances « complexes » (non-déTECTABLES par nos trois tests) recensés dans les 63 bassins versants du Massif central.....	225
Tableau 11.4 : interprétation des matrices de simulation croisées pour le bassin 38 (L'Homol à Echelette - 34.4 km ² - puis l'Homol à Davaladou - 31.2 km ² -, transfert réalisé en 1974)	226
Tableau 11.5 : interprétation des matrices de simulation croisées pour le bassin 12 (l'Aurence à Moulin Pinard)	227
Tableau 11.6 : interprétation des matrices de simulation croisées pour le bassin 34 (l'Yzeron à Craponne).....	228