

**Université Pierre et Marie Curie, École des Mines de Paris  
& École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts**

---

**Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie  
Parcours Hydrologie-Hydrogéologie**

**Influence du boisement ou du déboisement sur le débit des rivières**

**Vincent TRINQUET**

**Directeur de recherche : Vazken Andréassian**



**CEMAGREF Antony  
U.R. Hydrosystèmes et  
Bioprocédés**

**Septembre 2009**





## ABSTRACT

This report deals with the influence of forest, and particularly of forest treatments (clear-cut, cut, plantations) on stream-flow. We use paired-catchment analysis as the basic technic to understand the influence of several types of forest treatment on streamflow. Paired catchment analysis consists in having two very similar catchments next to each other, and to apply a treatment to one, while keeping the other untouched.

Available data sets are divided into two periods: pretreatment period (= calibration period) during which we identify a relationship between the stream-flow of the two watersheds, and control period (after treatment) during which the relationship (obtained during the pretreatment period) is applied in order to reconstitute pristine streamflow: measured stream-flow can then be compared with the simulated streamflow. A variant of this method (involving a sequential sliding calibration) is also used.

Our results, based on the analysis of 18 long-term paired watershed experiments, allows us to interpret the impact of different forest treatments on streamflow (annual flow, low flows and high flows). We conclude that:

1. The impact of clearcut on streamflow depends on the climatic characteristics of the catchment: the most important increase of streamflow is observed in the areas where the water deficit is large.
2. Cutting the forest could increase annual streamflow by about 20 or 30%.
3. Inversely, plantations can reduce streamflow by the same amount. However, in areas in which a high hydrical deficit is observed, like in Mokobulaan (South Africa), planting trees could completely dry up the rivers.
4. All the common percentiles (percentile 0.2, 0.5, 0.8 and 0.95 apparently too) increase after cut (or decrease after plantations). However the paired catchment studies can't be used to detect the influence of cut on very high flows.
5. Concerning the long-term impact of clearcut on streamflow, we found that after a period of increase after clearcut, a decrease is observed on a few sites, which could be explained by the regeneration of forest with young trees which are more active (from the evapotranspiration point of view) than older ones. The minimum is obtained a few decades (about 30 years) after cut. Our approach allows to show that this phenomenon – previously described in Australia – is not specific to this area.

At the end of the report, we compare our results to that of other studies, carried both in the same or in other forest watersheds worldwide. The advantages and the limits of the paired catchment studies are discussed and propositions are made for the continuation of the investigation.

## REMERCIEMENTS

Je remercie Vazken Andréassian d'avoir encadré ce stage particulièrement intéressant sur l'influence du boisement ou du déboisement sur le débit des rivières, d'avoir su me guider concernant les méthodes à utiliser pour la quantifier. Ses compétences en hydrologie forestière et son désir profond de partager le savoir à ses stagiaires m'ont été très enrichissants. Je lui serai reconnaissant de ce qu'il m'a appris, en particulier concernant la physiologie des arbres et le comportement de ces derniers vis-à-vis de l'eau, de la sécheresse..., thème qui me passionne.

Je remercie également toute l'équipe du Cemagref d'Antony, et en particulier Lionel Berthet, Laurent Coron et Thomas-Charles qui m'ont aidé pour écrire les programmes Fortran ou encore les programmes rédigés sous le logiciel R.

Je remercie le prof. Mike Bonell, de l'Université de Dundee, pour les discussions très intéressantes concernant mes résultats.

Enfin, je remercie les organismes qui ont accepté de mettre gracieusement à ma disposition les séries de données de débit des bassins versants appariés :

- Pour le Bassin Versant de Recherche du Réal Collobrier, Jacques Lavabre et Nathalie Folton au Cemagref d'Aix ;
- Pour la North Appalachian Experimental Watershed at Coshocton, Vickie Dreher de l'Agricultural Research Service (ARS) ;
- Pour la Fernow Experimental Forest, Hubbard Brook Experimental Forest et Andrews Experimental Forest, l'US Forest Service ;
- Pour Three Bar Experimental Watershed, Malchus Baker de l'US Forest Service ;
- Pour Mokobulaan, David Scott et Eric Prinsloo ;
- Pour Maroondah, Shane Haydon et Ian Watson de Melbourne Water.

# Table des matières

INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1. REVUE DE LA LITTERATURE .....	3
1.1. Pourquoi les forêts peuvent-elles avoir une influence sur le débit des rivières ?	3
1.1.1 Que deviennent les eaux pluviales en forêt? .....	3
1.1.2 Quelle est l'influence de la forêt sur le débit annuel, les crues et les étiages à l'exutoire du bassin versant forestier? .....	6
1.2. Quelles sont les méthodes permettant d'évaluer l'impact du boisement ou du déboisement .....	7
1.2.1 Modélisation pluie-débit.....	7
1.2.2 Modélisation débit-débit par la méthode des bassins versants appariés .....	7
CHAPITRE 2. PRESENTATION DES SITES CONSIDERES .....	8
CHAPITRE 3. DESCRIPTION DE LA DEMARCHE ADOPTEE ET DES CALCULS EFFECTUES. APPLICATION SUR UN EXEMPLE : LA FORET EXPERIMENTALE DE FERNOW .....	11
3.1. A la recherche du "meilleur" modèle débit-débit .....	11
3.2. Calage-contrôle préliminaire sur 18 paires de bassins versants forestiers .....	13
3.3. Calage avant traitement – « contrôle » après traitement.....	13
3.4. Calage-« contrôle » séquentiel.....	16
3.4.1 Calage- «contrôle» séquentiel pour une période de calage de 1 an .....	16
3.4.2 Calage- «contrôle» séquentiel pour une période de calage de 5 ans .....	19
CHAPITRE 4. SYNTHESE DES RESULTATS SUR 18 PAIRES DE BASSINS VERSANTS .....	20
4.1. Influence à court terme des coupes.....	20
4.1.1 Influence sur les débits courants .....	20
4.1.2 Influence sur les crues .....	24
4.2. Influence des coupes suivies d'applications d'herbicides .....	25
4.3. Influence à long terme des coupes (régénération de la forêt après la coupe) ..	26
4.4. Influence des plantations.....	28

CHAPITRE 5. DISCUSSION.....	29
5.1. Comparaison avec les études pluie-débit effectuées à Coshocton (Ohio) .....	29
5.2. Comparaison avec les résultats de la littérature, pour l'ensemble des sites.....	30
5.3. Avantages et limites de la méthode des bassins versants appariés.....	31
CONCLUSION .....	33
TABLE DES FIGURES ET DES TABLEAUX .....	35
TABLE DES ANNEXES.....	37
BIBLIOGRAPHIE.....	47
RESUME .....	51

## INTRODUCTION

C'est au sein du CEMAGREF d'Antony que j'ai effectué mon stage de Master (M2). Le stage a consisté à évaluer l'influence de la forêt, et en particulier du boisement ou du déboisement, sur le débit des rivières à des échelles de l'ordre du km<sup>2</sup>.

Pour l'étude, nous nous sommes appuyés sur les chroniques de débits de 8 sites. Parmi eux, 5 sont aux Etats-Unis (*Andrews Experimental Forest* en Oregon, *North Appalachian Experimental Watershed at Coshocton* en Ohio, *Fernow Experimental Forest* en Virginie Occidentale, *Hubbard Brook Experimental Forest* dans l'Etat du New Hampshire, *Three Bar Experimental Watershed* en Arizona). Les autres sont situés en France (le *Bassin Versant de Recherche du Réal Collobrier*), en Afrique du Sud (Mokobulaan) et en Australie (Maroondah).

Ces sites présentent l'intérêt de bénéficier de longues chroniques de débits et d'avoir subi une modification importante de leur couvert forestier. Cette modification sera désormais appelée "traitement" dans la suite de ce rapport. Il peut s'agir d'une coupe à blanc (lorsque le peuplement forestier est abattu en une fois), d'une coupe partielle suivie ou non de la régénération naturelle de la forêt, de plantations de jeunes arbres... Ce traitement, d'origine le plus souvent anthropique, permet d'étudier l'influence du couvert forestier (ou au moins du traitement) sur le débit de la rivière.



**Figure 1 : La forêt de Fernow (Virginie Occidentale)**

Dans un premier temps, nous porterons notre attention sur la littérature concernant le sujet. Nous expliquerons pourquoi les forêts peuvent avoir une influence sur le débit des rivières, quels sont les phénomènes biologiques et physiques mis en jeu. Et nous évoquerons les méthodes usuellement mises à profit pour évaluer l'impact du boisement ou du déboisement sur le débit des cours d'eau. Nous présenterons en particulier la modélisation pluie-débit et l'analyse à base de bassins versants appariés (méthode que nous avons préférée pour ce stage).

Ensuite, nous présenterons les sites étudiés lors du stage, leurs caractéristiques et la modification de leur couvert végétal (s'il s'agit de plantations, de coupes, d'application d'herbicides, d'incendie...).

Puis nous détaillerons les différentes analyses que nous avons menées à partir du schéma expérimental des bassins versants appariés, les calculs effectués. Au cours du stage, nous avons commencé par travailler sur le choix d'un modèle débit-débit. Nous avons ensuite réalisé un calage-contrôle préliminaire dont nous expliquerons l'utilité. Puis nous avons appliqué la méthode classique du calage avant traitement-« contrôle » après traitement et celle moins connue du calage-« contrôle » séquentiel. Nous illustrerons ces méthodes sur l'exemple de la forêt expérimentale de Fernow (Virginie Occidentale, Etats-Unis).

En quatrième partie, nous résumons les résultats de chacun des sites, plus exactement de chacune des paires de bassins versants, en particulier en ce qui concerne l'influence à court terme et à long terme des coupes et l'influence de plantations.

Enfin, nous essaierons de prendre du recul vis-à-vis de la méthode utilisée, en discutant les résultats obtenus, et en comparant nos résultats à ceux d'autres études ayant été effectuées (parfois) sur les mêmes sites (notamment à Coshocton dans l'Ohio). Seront analysés les avantages et limites de la méthode des bassins versants appariés et proposées des pistes d'approfondissement.



**Figure 2: Le Réal Collobrier à Collobrières**



# Chapitre 1. REVUE DE LA LITTÉRATURE

## 1.1. Pourquoi les forêts peuvent-elles avoir une influence sur le débit des rivières ?

### 1.1.1 Que deviennent les eaux pluviales en forêt?

Tout d'abord, avant même d'essayer de quantifier l'influence de la forêt et de la modification du couvert végétal (boisement ou déboisement) sur le débit des rivières, il paraît important et particulièrement intéressant de comprendre quels peuvent être les phénomènes mis en jeu expliquant le rôle des arbres sur le cycle de l'eau.

La forêt agit sur le cycle de l'eau à plusieurs niveaux.

Le phénomène le plus important semble être l'évapotranspiration : par leurs racines, les arbres puisent l'eau du sol et la rejettent dans l'atmosphère par l'intermédiaire des feuilles (ouverture des stomates, situés généralement sur la partie inférieure des feuilles). Cette évapotranspiration est d'autant plus conséquente que la demande évaporatoire de l'atmosphère est importante, c'est-à-dire lorsque le rayonnement est important et la température élevée, donc en été. La forêt se distingue des autres types de végétation (prairies, champs...) par un système racinaire et une canopée (système foliaire) plus développés. Les forêts ont la possibilité de puiser de l'eau plus en profondeur et de mettre à disposition davantage d'eau pour l'atmosphère. Et cela d'autant plus que la rugosité des feuilles intervient, favorisant une couche de turbulence qui accroît l'évacuation de l'eau.

En revanche, la fermeture des stomates en période de sécheresse limite les pertes d'eau. Ce mécanisme naturel partiellement connu protège l'arbre de la déshydratation mais présente l'inconvénient, lors d'une sécheresse prolongée, d'empêcher la photosynthèse (le  $\text{CO}_2$  doit rentrer par les stomates). En été, la demande évaporatoire de l'atmosphère est très conséquente et la disponibilité en eau d'un sol nu n'est pas suffisante pour satisfaire à cette demande. On dit alors que l'évapotranspiration réelle (ETR) est nettement inférieure à l'évapotranspiration potentielle (ETP). En effet, même si l'énergie fournie par l'atmosphère serait théoriquement suffisante pour évaporer une certaine quantité d'eau, si celle-ci n'est pas disponible (notamment si l'eau est en quantité très faible dans les premiers centimètres du sol), il est sûr que seule l'eau disponible pourra être évaporée. Toutefois, si l'on considère non plus un sol nu mais un sol recouvert de prairies, d'espèces cultivées ou, mieux encore, d'arbres, les végétaux iront chercher au moyen de leurs racines de l'eau dans des horizons plus profonds, ce qui accroît la disponibilité en eau et donc l'évapotranspiration réelle (ETR). Cosandey (1995) explique que la forêt augmente l'évapotranspiration à condition que trois conditions soient réunies : que les formations superficielles soient assez profondes pour que la forêt puisse se distinguer des couverts végétaux à enracinement moins profond ; qu'il existe des périodes de déficit hydrique (sinon l'évapotranspiration réelle ne dépend que de l'ETP) ; enfin qu'il existe des périodes de surplus hydrologique (pour que les réserves se reconstituent).

A titre indicatif, nous redonnons en annexe 1 la formule de Penman-Monteith qui permet d'évaluer l'évapotranspiration d'une surface enherbée.

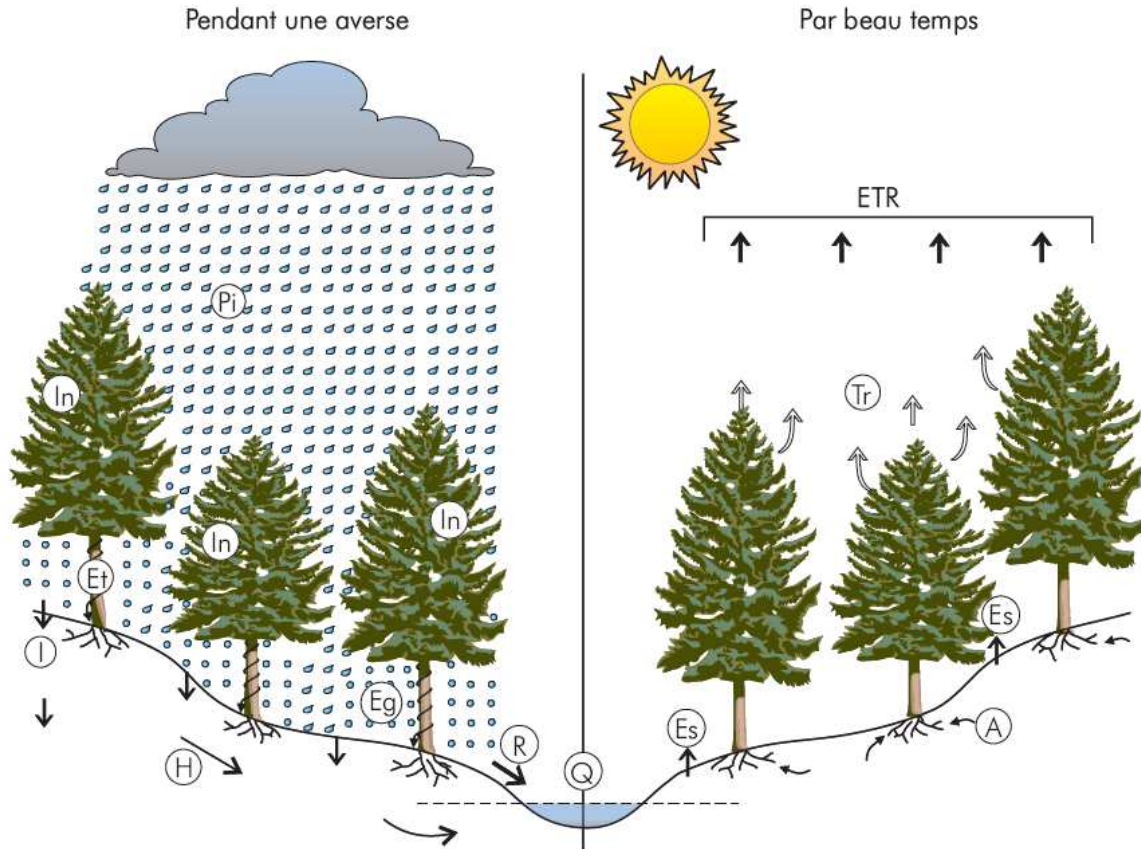


Figure 3: Bilan hydrique de la partie aérienne (source: Humbert J. et Najjar G., 1992)

Pi = Précipitations incidentes	H = Ecoulement hypodermique
In = Interception	Q = Ecoulement de la rivière
Eg = Précipitations parvenant plus ou moins rapidement au sol	Tr = Transpiration
Et = écoulement le long des troncs	Es = Evaporation du sol
I = Infiltration	A = Absorption racinaire
R = Ruissellement superficiel	ETR = Evapotranspiration réelle = Tr+Es (+In après une averse)

Lorsqu'il pleut, une partie de la pluie incidente  $P_i$  est interceptée (stockage, évaporation, transpiration), une autre ( $E_t$ ) s'écoule le long des troncs, une troisième ( $E_g$ ) s'égoutte et atteint le sol en passant par la canopée:  $P_i = I_n + E_t + E_g$ .

Nous présentons ci-dessous quelques détails sur les différents termes de ce bilan:

- L'interception et l'égouttement

L'interception dépend de l'essence forestière, de sa surface foliaire et de sa capacité à stocker l'eau. La surface foliaire, évaluée grâce à l'indice foliaire – LAI, *leaf area index* – (=surface de feuilles/surface du sol) dépend de l'âge ; pour une forêt donnée, elle est liée à la densité de peuplement. L'indice foliaire peut varier de manière sensible d'une forêt à une autre : de 3 à 10  $m^2/m^2$  de sol. La proportion d'eau interceptée décroît quand l'intensité et la durée de la pluie

augmentent, ce qui s'explique par le fait que les feuilles (ou les aiguilles) des arbres ne peuvent pas stocker plus qu'une certaine quantité d'eau. La rétention d'eau est évaluée à quelques millimètres. Au-delà l'eau tombe des feuilles. Naturellement, ce phénomène d'interception est lié à la surface foliaire. Elle s'arrête donc lors de la tombée des feuilles des essences caducifoliées tandis que les arbres à feuillage persistant gardent cette capacité même en hiver. Toutefois, en hiver, l'interception (qui, par définition, prend en compte l'évaporation qui suit le stockage de l'eau sur les feuilles) diminue très probablement de manière conséquente même pour les arbres à feuilles persistantes car la température hivernale (ainsi que le rayonnement lors de cette saison) ne permettent pas une évaporation importante. On peut noter néanmoins le cas particulier de la neige qui mériterait une étude approfondie.

Selon Cosandey (1984), l'interception par la végétation constitue 11 à 18 % de la pluie incidente. D'après Calder (Royaume-Uni), elle représenterait plutôt 35%. Quant à Humbert et Najjar (1992), ils établissent une distinction entre l'interception des résineux qui varierait entre 25 et 50% et celle des feuillus qui serait plus limitée, et estimée entre 15 à 30%.

- L'écoulement le long des troncs

Certaines essences d'arbre comme le hêtre possèdent la capacité de concentrer une quantité importante de l'eau de pluie au pied de leur tronc: l'eau s'écoule le long des branches puis du tronc (architecture de l'arbre caractérisée par des branches dirigées vers le haut et écorce du tronc particulièrement lisse).

- L'infiltration et le chevelu racinaire

Le système racinaire des arbres a tendance à décompacter le sol, d'où une augmentation de la capacité de rétention du sol. Par ailleurs, les racines (ou les cavités laissées par les racines décomposées) constituent un réseau de cheminements préférentiels marqué par une conductivité hydraulique horizontale plus importante (écoulements sub-surfaciques privilégiés par les sols forestiers).

- L'évapotranspiration

Celle-ci est directement liée à l'âge des peuplements forestiers: elle augmente au début de la vie du peuplement puis se met à décroître lorsque la forêt vieillit. La transpiration dépend de plusieurs facteurs qui sont en particulier le déficit de saturation de l'air, l'agitation de l'air ou vitesse du vent, la température, la lumière (Biot, 1965). L'évapotranspiration dépend de la transpiration par unité de surface de feuille et de la surface totale de feuilles. Comme l'explique P Biot dans son livre intitulé Formations végétales du globe, "beaucoup de végétaux, qui ont la plus forte transpiration par unité de surface ou de poids frais, ne portent qu'une surface totale de feuilles plus réduite (bouleau). Finalement la transpiration par unité de surface du sol n'est pas très différente de celle d'arbres comme le hêtre dont le feuillage est plus abondant, mais dont la transpiration par unité de surface ou de poids frais est moins active".

### 1.1.2 Quelle est l'influence de la forêt sur le débit annuel, les crues et les étiages à l'exutoire du bassin versant forestier?

Résumons les connaissances couramment admises concernant le rôle de la forêt respectivement sur le débit annuel, les crues et les étiages.

- Influence de la forêt sur le débit annuel

En terme de bilan annuel, comparée à d'autres couverts végétaux, la forêt se caractérise par une évapotranspiration plus importante, notamment en période estivale, et par une interception qui peut elle aussi être significative, d'où un transfert d'eau plus conséquent vers l'atmosphère et un débit annuel plus faible.

Selon Hibbert (1967), qui a analysé les résultats de 39 bassins versants situés notamment aux Etats-Unis,

- *La réduction du couvert forestier augmente le rendement en eau des bassins versants*
- *A l'inverse l'établissement d'une couverture forestière sur un terrain à végétation clairsemée diminue le rendement en eau des bassins versants.*
- La réponse de l'écoulement vis-à-vis du traitement est très variable et, dans la plupart des cas, imprévisible

- Influence de la forêt sur les crues

La forêt a tendance à écrêter les crues. Cela peut s'expliquer par la forte capacité d'infiltration des sols forestiers qui a pour conséquence de réduire le ruissellement de surface. Néanmoins, ce rôle bénéfique de la forêt se trouve limité pour de fortes crues (Hewlett,1982). En effet, pour des événements forts, tout ruisselle ou s'exfiltre quel que soit le couvert végétal. Toutefois, la forêt limite le transport de matériaux en suspension.

- Influence de la forêt sur les étiages

En raison de sa plus forte évapotranspiration réelle, la forêt rend les étiages plus sévères. Ayant puisé de l'eau dans le sol et asséché ce dernier, les réserves du sol mettront davantage de temps pour se reconstituer après la saison sèche, d'où une reprise de l'écoulement plus tardive.

Il faut noter que certains forestiers pensent que la forêt a plutôt tendance à augmenter les étiages, grâce à une meilleure recharge des réserves du sol qu'autoriserait la forte capacité d'infiltration des sols forestiers.

## 1.2. Quelles sont les méthodes permettant d'évaluer l'impact du boisement ou du déboisement

### 1.2.1 Modélisation pluie-débit

Pendant longtemps, au Cemagref, les chercheurs ont fait appel à la modélisation pluie-débit et en particulier au modèle à réservoirs du génie rural journalier à 4 paramètres (GR4J) pour détecter et quantifier l'influence du boisement ou du déboisement sur le débit des rivières. Cela consiste à suivre l'évolution de la relation pluie-débit suite à un changement d'occupation des sols. Cependant, lors de ce stage, nous n'avons pas utilisé de modèle pluie-débit. Nous avons préféré la méthode dite des bassins versants appariés présentée au paragraphe suivant.

### 1.2.2 Modélisation débit-débit par la méthode des bassins versants appariés

L'une des méthodes couramment mises en œuvre en hydrologie forestière est celle des bassins versants appariés. Son principe général est le suivant :

Le débit journalier est mesuré sur deux bassins versants proches et similaires. Il est nécessaire qu'ils soient semblables notamment en ce qui concerne leur taille, géologie, climat – pluie et évapotranspiration potentielle –, occupation des sols. Ils doivent se caractériser par un comportement hydrologique, c'est-à-dire une transformation de la pluie en débit, similaire. On cherche en effet des bassins qui soient réellement jumeaux. Cela permet de caler une relation entre le débit de chacun des 2 bassins versants (par exemple  $Q_A = 1,1 \cdot Q_B$ ),  $Q_A$  et  $Q_B$  représentant le débit journalier, exprimé en lame d'eau, de chacun des 2 bassins versants.

L'un des bassins versants va ensuite subir une modification de son couvert végétal (par exemple une coupe à blanc, une coupe partielle, ou au contraire une plantation) tandis que l'autre restera inchangé. Grâce à ce bassin de référence que l'on nomme bassin de contrôle et à la relation précédemment établie, on peut déduire quel aurait été le débit du bassin traité si ce dernier était resté intact. On en déduit l'influence du traitement forestier (coupe, plantations...) sur le débit.

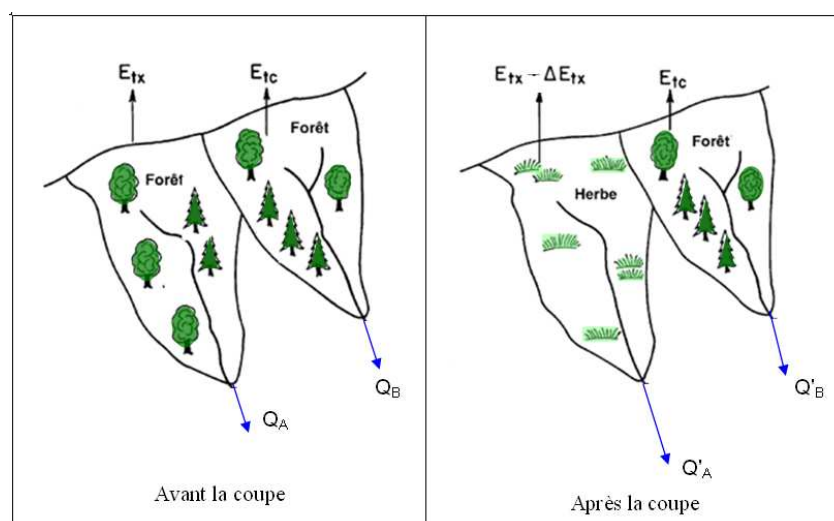


Figure 4: Explication de la technique des bassins versants appariés

## Chapitre 2. PRESENTATION DES SITES CONSIDERES

Rappelons que les 8 sites considérés lors du stage sont *Andrews Experimental Forest* en Oregon, *North Appalachian Experimental Watershed at Coshocton* en Ohio, *Fernow Experimental Forest* en Virginie Occidentale, *Hubbard Brook Experimental Forest* dans l'Etat du New Hampshire, *Three Bar Experimental Watershed* en Arizona), le *Bassin Versant de Recherche du Réal Collobrier* en France, *Mokobulaan* en Afrique du Sud et *Maroondah* en Australie. Le graphique ci-dessous exprime le rendement en eau des bassins versants en fonction de l'inverse de l'indice d'aridité, Q désignant le débit interannuel, P la pluie et ETP l'évapotranspiration potentielle.

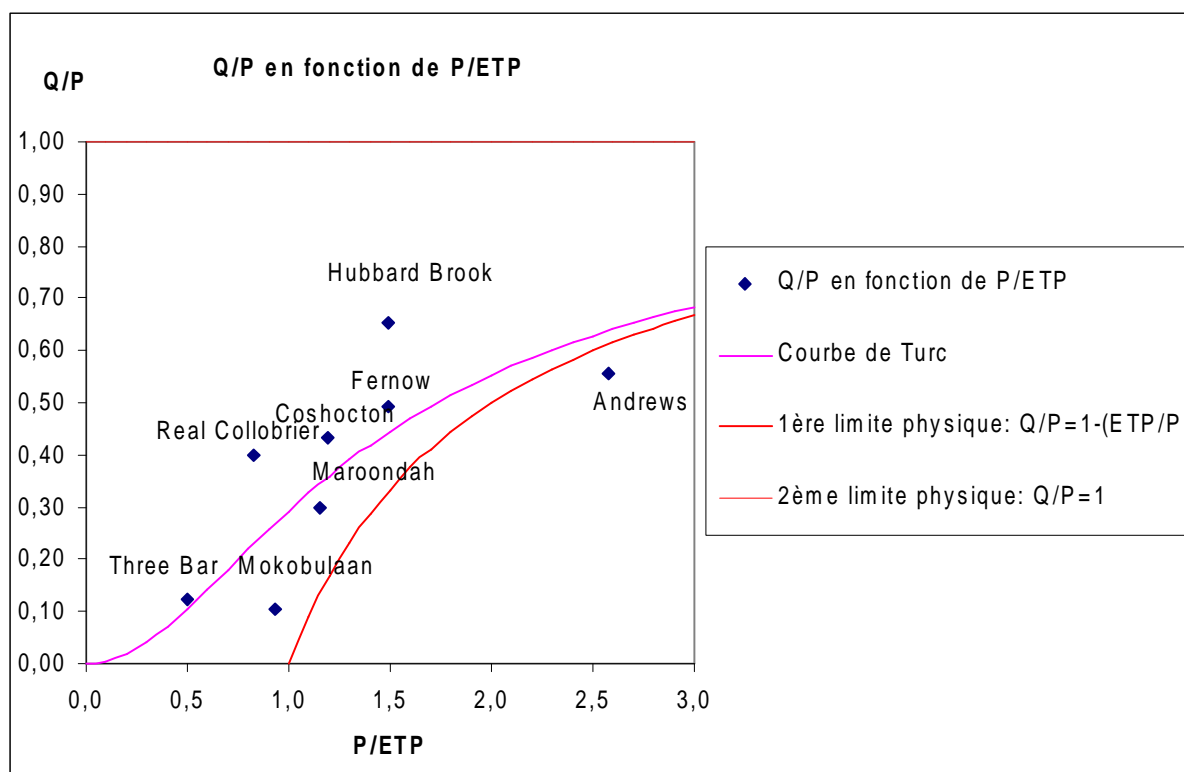


Figure 5: Q/P en fonction de P/ETP pour les 8 sites considérés

Pour certains sites, on disposait de plusieurs bassins versants. C'est le cas notamment de Fernow dont les différents sous-bassins versants n'ont pas subi le même traitement, le bassin versant n°4 demeurant intact et servant de référence.

Ainsi, le tableau qui figure à la page suivante présente les caractéristiques de 18 paires de bassins versants, la pluie et le débit à l'exutoire du bassin versant traité, le déficit hydrique avant traitement, l'altitude, le type de traitement subi et l'occupation des sols (avant et après le traitement). En résumé, Andrews, Fernow, Hubbard Brook et Maroondah ont subi des coupes à blanc (suivies ou non d'application d'herbicides), le Réal Collobrier et Three Bar, un incendie (suivi d'applications d'herbicides en ce qui concerne Three Bar), Mokobulaan et Coshocton des plantations de jeunes arbres.

Paire de bassins versants	n°	Etat	Pluie P (mm/an)	Débit Q (mm/an)	P-Q (mm/an)	Altitude (m)	Traitement	Occupation des sols
Andrews	1	Oregon (USA)	2400	1170	1230	700	Coupe à blanc (zone riparienne incluse)	Forêt de 450 ans de Douglas et Tsuga heterophylla. La végétation riparienne de conifères se voit remplacée (après la coupe) par des aulnes, des saules et des peupliers.
Coshocton	2	Ohio (USA)	940	360	580	350	Plantations de pins sur 70 % de la surface	Anciennes terres agricoles
Fernow 1/4	3	Virginie Occidentale (USA)	1300	540	760	750	Coupe à blanc (74 % de la surface terrière)	Forêt d'une cinquantaine d'années constituée de chênes, érables, cerisiers et hêtres
Fernow 2/4	12			670	630		Coupes partielles	
Fernow 3/4	13			650	650		Coupe à blanc (+ herbicides) (91 % de la surface terrière)	
Fernow 5/4	14			800	500		Coupes partielles	
Fernow 6/4	15			500	800		Coupe à blanc (2*50 % de la surface terrière) (+ herbicides)	
Fernow 7/4	16			790	510		Coupe à blanc (2*50 % de la surface terrière) (+ herbicides)	
Hubbard Brook 2/3	4	New Hampshire (USA)	1300	940	360	600	Incendie (+hercicides)	Forêt d'une cinquantaine d'années composée d'érables, de hêtres et de bouleaux. Des cerisiers et de nombreux bouleaux sont apparus après l'incendie
Hubbard Brook 5/3	5			860	440		Incendie	
Mokobulaan A/C	6	Afrique du Sud	1170	260	910	1400	Plantations d'eucalyptus sur l'ensemble du bassin versant, y compris la zone riparienne	Pâturages initialement
Mokobulaan B/C	7			220	950		Plantations de pins sur l'ensemble du bassin versant, y compris la zone riparienne	Pâturages initialement
Real Collobrier Rimbaud / Valescure	8	France	950	650	300	550	Incendie	Maquis composé de chênes verts, d'arbousiers et de bruyères arborescentes
Real Collobrier Rimbaud / Vaubarnier	9							
Three Bar B/D	10	Arizona	650	débit intermittent		1200	Incendie + herbicides	'Chaparral' : Maquis dense de chênes verts et de manzanita
Three Bar C/D	11			débit intermittent			Incendie + herbicides	
Maroondah Picaninny Creek / Slip Creek	17	Victoria (Australie)	1300	240	1060	230	Coupe à blanc (78 %)	Forêt multi-centenaire d'Eucalyptus
Maroondah Myrtle 2/Myrtle 1	18			1700	940	650	Coupe à blanc (74 %)	Forêt de 100 à 250 ans d'Eucalyptus

Tableau 1 : Présentation des caractéristiques des 18 paires de bassins versants





## Chapitre 3. DESCRIPTION DE LA DEMARCHE ADOPTEE ET DES CALCULS EFFECTUES. APPLICATION SUR UN EXEMPLE : LA FORET EXPERIMENTALE DE FERNOW

### 3.1. A la recherche du "meilleur" modèle débit-débit

Nous avons cherché à tester un certain nombre de modèles permettant de reconstituer le débit journalier d'un bassin versant à partir de celui d'un bassin versant proche, afin de sélectionner le(s) meilleur(s) modèle(s) avant de les appliquer à nos bassins versants forestiers. Afin de ne pas être dépendant d'un cas particulier (où tel ou tel modèle conviendrait bien par hasard pour un couple de bassins versants donné) les modèles ont été testés sur un grand nombre de bassins versants : 1039 bassins versants français. Pour chaque bassin versant de la base assemblée par Le Moine (2008), le bassin versant le plus proche (non emboîté) a été sélectionné. Le critère de performance choisi a été le C2M au contrôle. Le C2M est un indicateur de la précision du modèle d'autant plus grand que la somme des carrés des erreurs (sur les débits, leur racine carrée ou leur logarithme) est petite, cf.annexe 2. Il correspond à un critère de Nash qu'on aurait borné entre -1 et 1. La période de calage s'étend de 1995 à 2000 et celle de contrôle (qui sert à l'évaluation du modèle) de 2000 à 2005. Les 34 formules (modèles) testées (dont le nombre de paramètres varie de 1 à 6.) sont détaillées en annexe 3. Nous ne présenterons ici que les principales :

- Modèle 1

Le modèle le plus simple est le modèle numéro 1 qui suppose que le débit journalier  $Q_A(i)$  d'un bassin versant A est approximativement proportionnel au débit  $Q_B(i)$  d'un bassin versant proche, à savoir :  $Q_A(i) = \alpha X_1 Q_B(i)$

le coefficient  $\alpha$  désigne le rapport des volumes sur la période de calage :  $\alpha = \frac{\sum_{i \in \text{calage}} Q_A(i)}{\sum_{i \in \text{calage}} Q_B(i)}$ , où  $Q_A(i)$  et  $Q_B(i)$  désignent respectivement le débit journalier à l'exutoire des bassins versants A et B

$X_1$  est le paramètre du modèle à caler (il est proche de 1)

- Modèle 2

Le modèle 2, à 2 paramètres est un modèle en puissance. Cela revient à approximer le débit journalier  $Q_A$  d'un bassin versant A par le débit  $Q_B$  d'un bassin versant proche à une certaine puissance  $X_2$ , le tout multiplié par un certain paramètre  $X_1$  (et par le coefficient  $\alpha$ ):

$$Q_A(i) = \alpha X_1 Q_B(i)^{X_2}$$

En pratique, la puissance  $X_2$  reste proche de 1.

- Modèle 15

Le modèle 15, semblable au modèle 2 introduit en outre un décalage temporel:

$$Q_A(i) = \alpha X_1 Q_B(i - X_3)^{X_2}$$

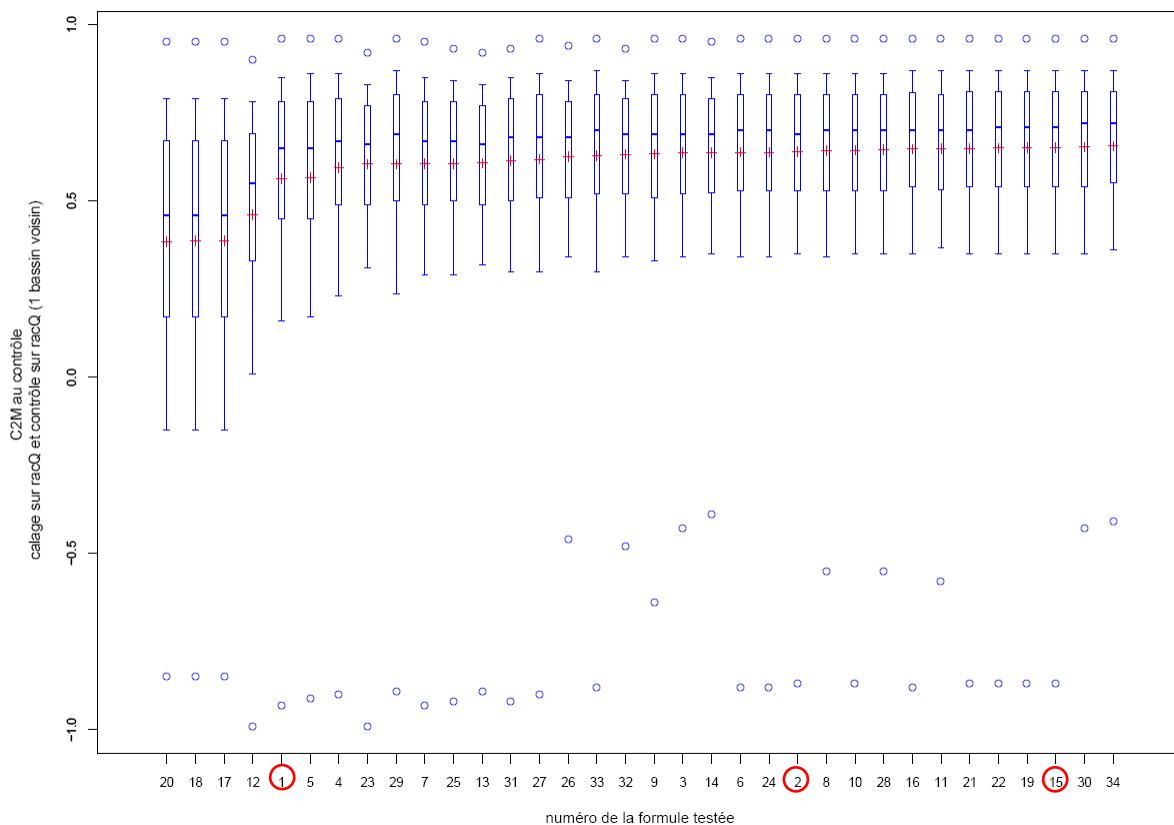
$X_2$  étant a priori proche de 1 et positif

$X_3$  (qui correspond à un décalage temporel) étant a priori proche de 0 et pouvant être négatif

Ce troisième paramètre permet d'exprimer le débit journalier  $Q_A$  non plus en fonction du débit  $Q_B$  du même jour mais en fonction d'une pondération du débit  $Q_B$  de 2 jours consécutifs bien choisis.

Pour distinguer les meilleurs modèles respectivement en crues, débits moyens ou en étiages, nous avons réalisé le calcul pour un calage et un contrôle sur  $Q$ ,  $\sqrt{Q}$  et  $\ln Q$ . Nous avons obtenu à peu de choses près le même classement des formules pour les trois fonctions objectifs.

Les résultats ont été les suivants:



**Figure 6: Distribution des performances au contrôle des 34 formules testées (critère de performance utilisé : C2M sur la racine des débits ; échantillon de bassins : 1039 bassins versants français.) Chaque croix rouge correspond à la moyenne, les ronds bleus au minimum et maximum, les traits aux quantiles 0.1, 0.25, 0.5, 0.75 et 0.9. Le classement des formules a été effectué par ordre croissant selon la moyenne.**

Remarque: des résultats similaires sont observés pour un calage-contrôle sur  $Q$  ou sur  $\ln Q$ .

Finalement, nous avons retenu le modèle 15 qui présente des résultats corrects comparés aux autres modèles et qui présente l'avantage de n'avoir que 3 paramètres à caler. Les modèles 30 et 34 qui sont légèrement plus performants ont chacun au moins 4 paramètres.

### **3.2. Calage-contrôle préliminaire sur 18 paires de bassins versants forestiers**

Avant de détecter l'influence du boisement ou du déboisement (plantations, coupes...) sur le débit des rivières, nous avons effectué un calage-contrôle préliminaire qui permet d'évaluer la qualité du modèle débit-débit choisi vis-à-vis de chacun des sites, plus précisément de chacune des 18 paires de bassins versants forestiers.

Le principe est le suivant:

- on divise la période avant-traitement (pendant laquelle la relation entre les débits des 2 bassins versants est censée être stationnaire) ;
- on cale les paramètres sur la moitié de la période ;
- on contrôle sur la deuxième ;
- puis on inverse la période de calage et celle de contrôle.

Nous donnons en annexe 4 la valeur de l'indicateur de performance C2M du modèle 15 appliqué à chacune des 18 paires de bassins versants. En annexe 2, nous proposons des réflexions sur le choix du calage (et du contrôle): sur le débit  $Q$ , la racine carrée de  $Q$  ou sur  $\log Q$ .

### **3.3. Calage avant traitement – « contrôle » après traitement**

Dans le cadre du stage, nous avons utilisé la technique dite des bassins appariés: le débit est mesuré avant et après le traitement (ce dernier pouvant être par exemple une coupe à blanc) sur deux bassins versants proches et similaires. On choisit de caler les paramètres du modèle débit-débit sur l'ensemble de la période avant traitement, cette période étant supposée suffisamment longue pour déterminer la relation entre les débits des 2 bassins versants. Puis, nous appliquons cette même formule pendant la période de post-traitement afin de savoir quel aurait été le débit du bassin traité si ce dernier n'avait pas subi le traitement.

Prenons l'exemple du couple de bassins versants de Fernow.

La forêt expérimentale de Fernow a instaurée en 1951 dans les Appalaches, en Virginie Occidentale. Suite à une sécheresse sévère, il a été décidé de tester l'opportunité d'accroître le rendement en eau des bassins versants forestiers. Un certain nombre de bassins versants ont été jaugés. Dans l'étude qui nous intéresse, un bassin versant, appelé bassin traité subit des traitements entre l'hiver 1963-1964 et fin 1969: la coupe à blanc de l'hiver 1963-1964 (de la moitié supérieure du bassin versant), celle de l'hiver 1966-1967 (de la partie inférieure) et l'application d'herbicides suite à chacune des coupes jusqu'en Octobre 1969. Pendant ce temps, l'autre bassin versant reste intact et peut donc servir de référence.

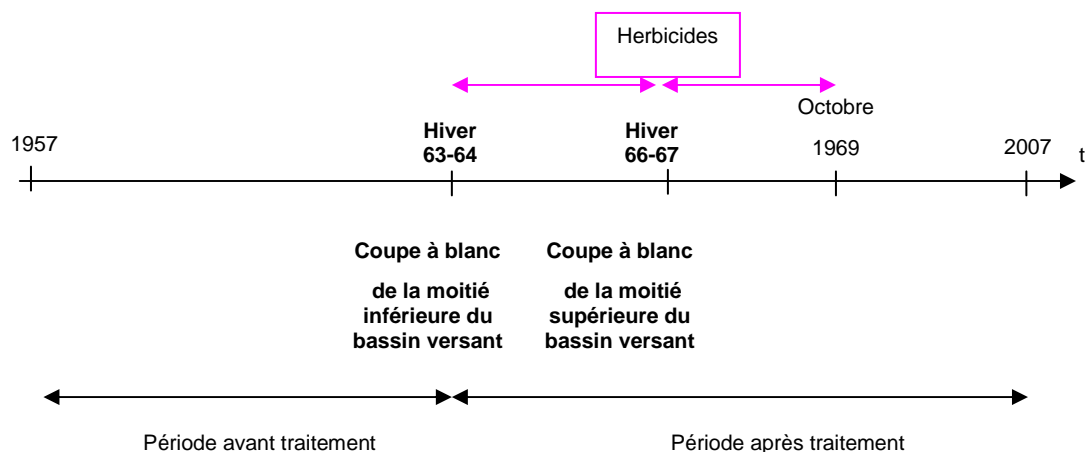


Figure 7 : Calendrier des opérations de coupe sur le bassin versant n° 7 de Fernow

Sur la période avant traitement, le modèle 15 s'appuyant sur la relation  $Q_A(i) = \alpha X_1 Q_B(i - X_3)^{X_2}$  convient très bien. Cela peut se voir graphiquement par la superposition de la courbe du débit simulé et du débit mesuré. (\*)

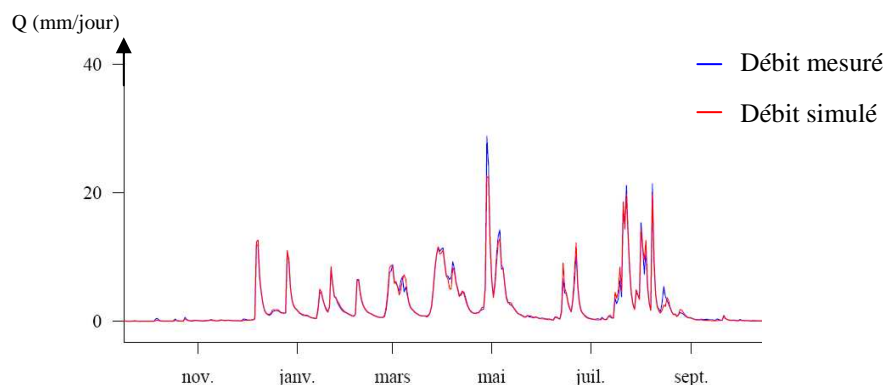
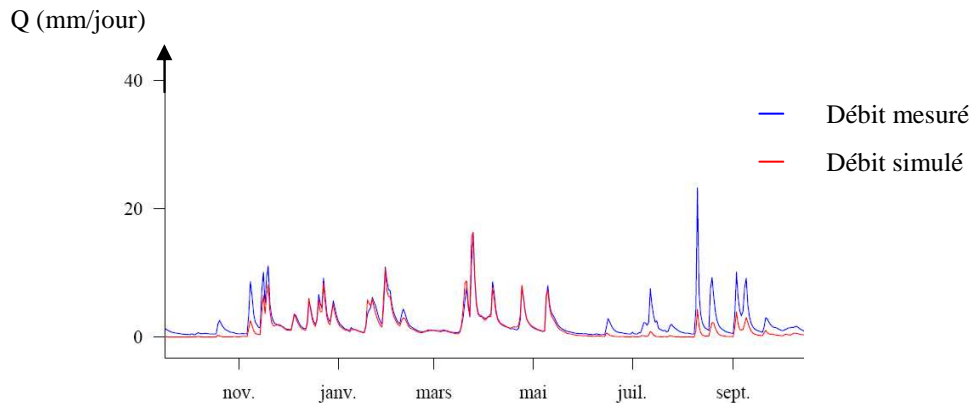


Figure 8 : Débit journalier simulé (courbe rouge) et mesuré (courbe bleue) une année donnée de la période de calage (Calage sur la racine-carrée du débit), du 1<sup>er</sup> octobre 1957 au 1<sup>er</sup> octobre 1958. NB: lorsque la courbe bleue n'est pas visible, c'est qu'elle est cachée derrière la courbe rouge (superposition des deux courbes)

(\*) En réalité, le fait que les courbes se superposent bien au calage est un indice limité de la qualité du modèle. Pour tester cette dernière avec plus de rigueur, nous avons, comme nous l'avons expliqué au paragraphe précédent, établi un calage-contrôle préliminaire divisant la période avant traitement en 2 périodes, l'une de calage, l'autre de contrôle. Et nous avons obtenu une valeur très bonne du C2M au contrôle, s'élevant à 0.87 et 0.96 respectivement lorsque l'on cale et l'on contrôle sur  $\sqrt{Q}$  et sur Q.

Puis peu après la première coupe (d'hiver 1963-1964) on commence à observer chaque année une sous-estimation persistante du débit journalier en été, automne et au début de l'hiver: globalement de juin à novembre ; cela laisse supposer que le débit du bassin traité (au moins relativement à celui du bassin de contrôle, qui, quant à lui, est censé être stationnaire) s'est accru à cause de la coupe. En revanche, les débits du reste de l'année (hiver et printemps) restent toujours bien simulés.

A titre indicatif, nous présentons ci-dessous le graphe du débit simulé et du débit mesuré une année donnée de la période après traitement, entre le 1<sup>er</sup> Octobre 1968 et le 1<sup>er</sup> Octobre 1969, soit entre 2 et 3 ans après la deuxième coupe, pour illustrer nos propos.



**Figure 9: Débit journalier simulé (courbe rouge) et mesuré (courbe bleue) une année donnée de la période de contrôle (Calage sur la racine-carrée du débit), du 1<sup>er</sup> octobre 1968 au 1<sup>er</sup> octobre 1969**

Même si dans ce rapport, nous ne pouvons pas reproduire les graphiques de chaque année, il faut savoir que cette tendance à la sous-estimation des débits de juin à novembre est observée chaque année à partir de juin 1964, et cela jusqu'en 1975, soit environ 6 ans après la dernière application d'herbicides.

Grâce à ces courbes, nous pouvons déduire que pendant la période qui s'étend de l'hiver 1963 à 1975, le bassin traité a été marqué par des débits estivaux et automnaux importants par rapport à ceux du bassin de contrôle, ce qui semble être occasionné par les coupes et l'application régulière d'herbicides. Physiquement, cela peut s'expliquer par le fait que, les arbres ayant été coupés, ils ne pompent plus (ou plus autant) d'eau dans le sol qu'avant, ainsi, les sols ne sont plus aussi secs et lors de pluies ou d'orages, les sols arrivent plus facilement à saturation, d'où un ruissellement plus conséquent. Par ailleurs, en automne, leurs réserves se remplissent plus vite, d'où un éventuel effet piston et en aval un écoulement automnal plus fort comparé à celui observé avant le traitement. Comme l'explique Claude Cosandey, "Une profondeur d'enracinement plus importante a pour résultat une réserve utile plus élevée, et une évaporation d'été potentiellement plus forte, ce qui retarde la reprise des écoulements d'hiver en les minimisant d'autant" (Cosandey, 2003). A l'inverse, la coupe et les herbicides ont provoqué l'absence de racines vivantes profondes et de feuilles transpirant l'eau (végétation limitée voire absente), d'où une évapotranspiration estivale moins grande et une reprise de l'écoulement plus rapide.

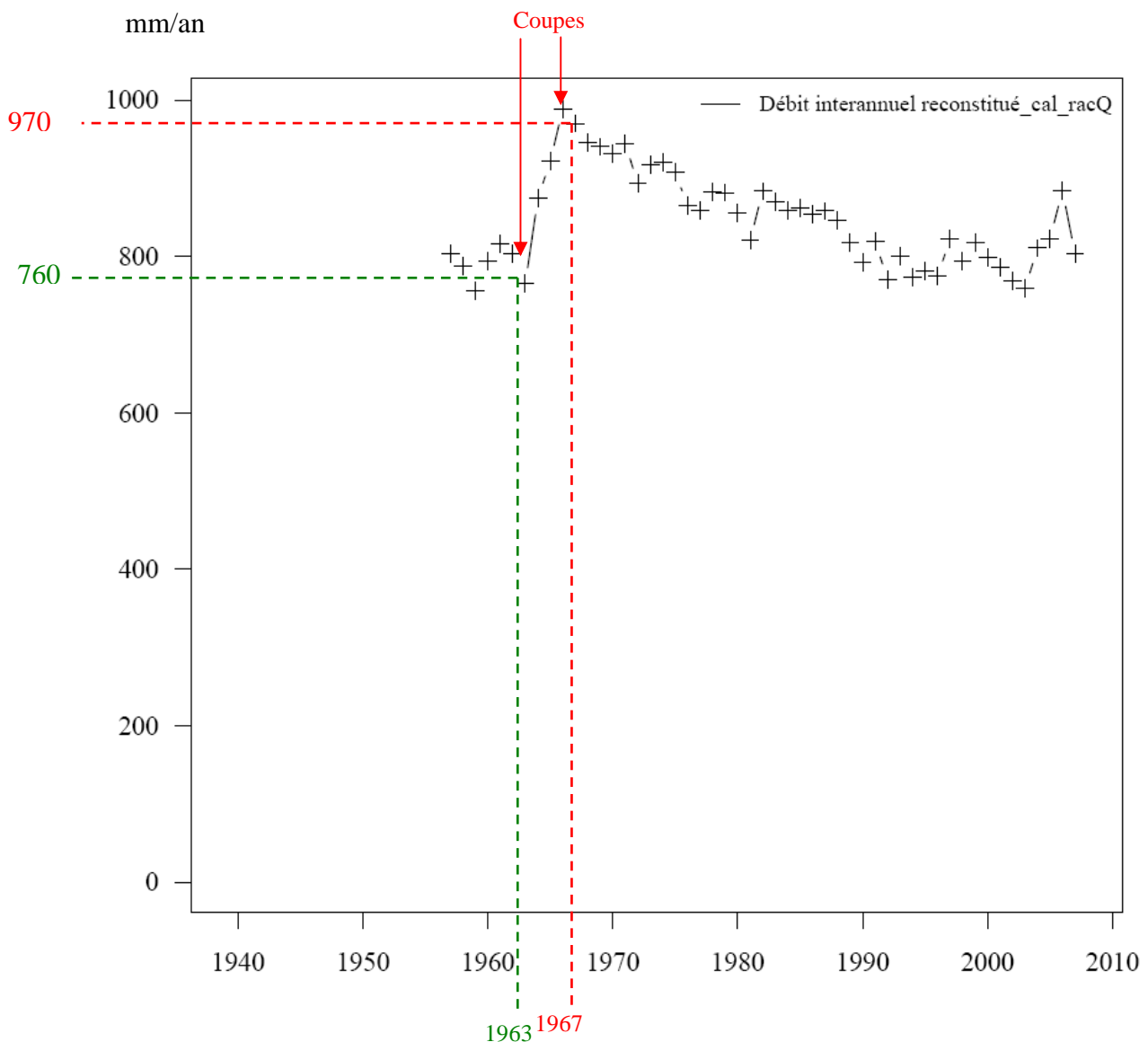
### **3.4. Calage-« contrôle » séquentiel**

#### **3.4.1 Calage- «contrôle» séquentiel pour une période de calage de 1 an**

Le principe de la méthode du calage-contrôle séquentiel, illustré sur la figure ci-dessous, est le suivant :

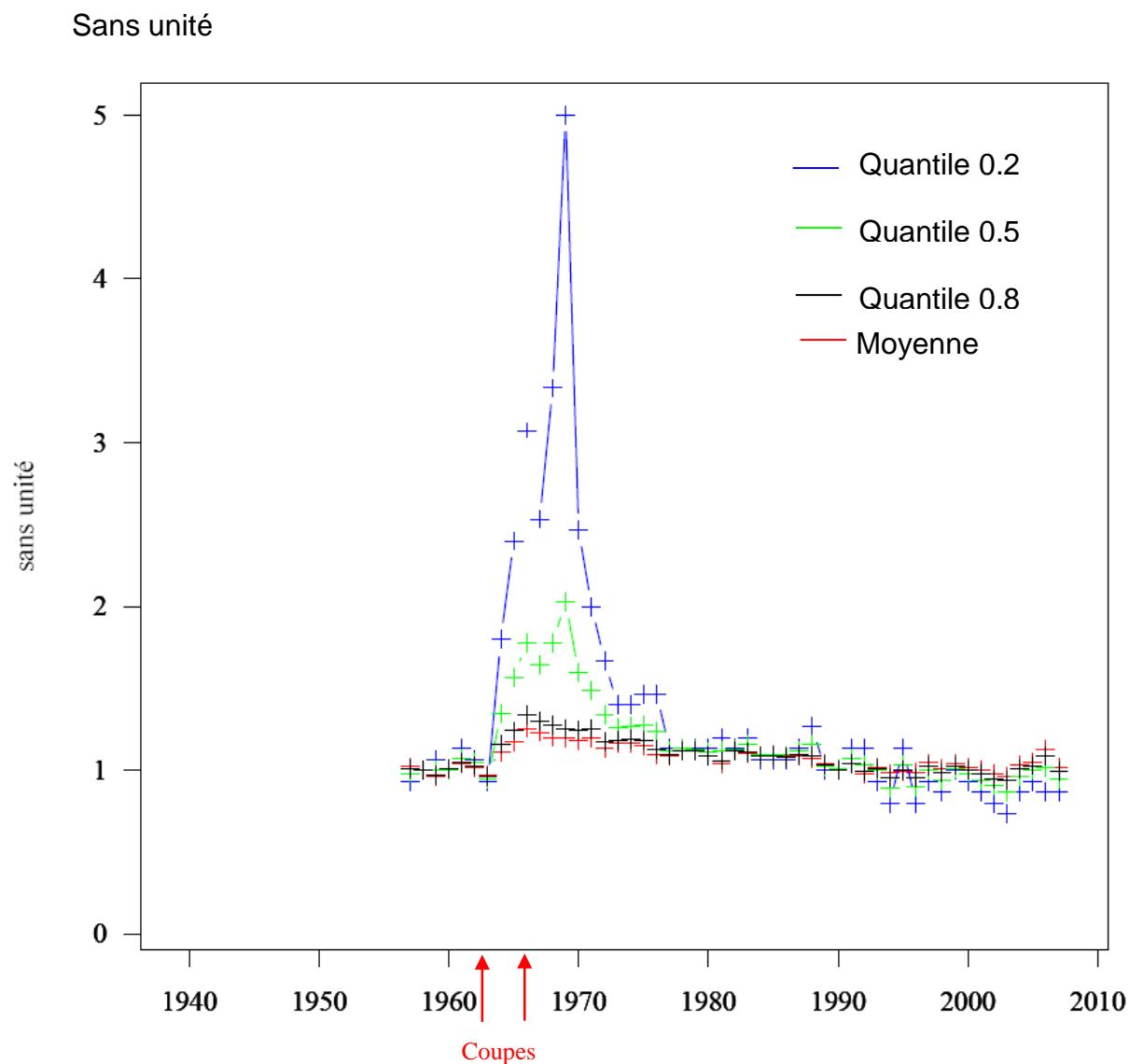
- on considère une année (hydrologique) donnée
- on cale sur cette année les 3 paramètres
- on reprend ce jeu de paramètres et on l'applique chaque jour de chaque année de la chronique pour reconstituer à partir du débit  $Q_B$  du bassin de référence le débit  $Q_A$  du bassin traité qu'on aurait observé si les paramètres étaient restés les mêmes que cette année-là. Et en sommant les débits journaliers et en divisant par le nombre d'années, on obtient le débit interannuel reconstitué avec les paramètres de l'année considérée
- on recommence en considérant chacune des années hydrologiques.

Prenons le cas de la forêt expérimentale de Fernow (le bassin versant n°7 comparé au bassin versant n°4). En 1963, les paramètres  $X_1$ ,  $X_2$  et  $X_3$  étaient tels que s'ils étaient restés les mêmes pendant toute la chronique de débit, le débit moyen interannuel de la chronique (qui s'étend de l'année hydrologique 1957 à 2007) aurait été de 760 mm/an. De même les valeurs des paramètres correspondant au calage durant l'année hydrologique 1967 auraient abouti à un débit moyen interannuel d'environ 970 mm/an.



**Figure 10 : Evolution du débit interannuel reconstitué (ramené à 1an), pour une période de calage de 1 an d'étendue: méthode du Calage- «contrôle» séquentiel 1 an appliquée à Fernow 7/4**

On constate une augmentation importante du débit reconstitué peu après la coupe à blanc de la moitié inférieure du bassin versant d'hiver 1963-64. Cette augmentation se poursuit durant quelques années. Par contre la deuxième coupe – hiver 1966-67 – (année hydrologique 1967) semble être sans effet perceptible sur le débit moyen, ce qui peut paraître surprenant. Toutefois, il faut savoir que l'année hydrologique 1966 était particulièrement sèche, ce qui a pu amplifier artificiellement l'ampleur de l'augmentation consécutive à la première coupe cette année-là. Intéressons-nous maintenant à l'évolution des différents quantiles en fonction du temps.



**Figure 11 : Evolution relative des quantiles (en indice 100) à Fernow 7/4. Les courbes bleue, verte et noire et rouge correspondent respectivement aux quantiles 0.2, 0.5, 0.8 et à la moyenne (pour un calage sur la racine carrée des débits)**

Si l'on fait abstraction du premier pic qui est peut-être dû à la particularité de l'année hydrologique 1966 marquée par la sécheresse, on constate que les 2 coupes (suivies chacune par des applications d'herbicides) provoquent une augmentation des faibles débits les années qui les suivent (quantiles 0.2 et 0.5). Mais, à la différence de la première coupe, la deuxième coupe n'aurait peut-être d'effet que sur les débits de la période de basses eaux (de juin à novembre), comme nous l'a suggéré l'approche du calage avant traitement-« contrôle » (ou reconstitution) après traitement.

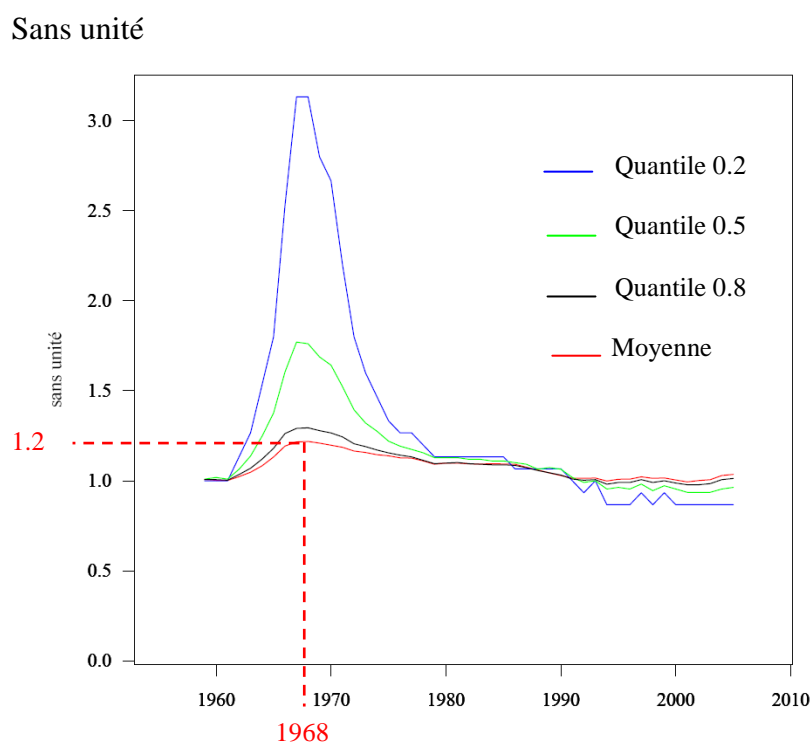


### 3.4.2 Calage- «contrôle» séquentiel pour une période de calage de 5 ans

Dans le paragraphe précédent, nous avons exposée la méthode du *Calage- «contrôle» séquentiel 1 an* : le calage s'effectue sur une année (hydrologique) et le contrôle est appliqué à la totalité de la chronique. Toutefois, on peut s'interroger sur la longueur de la période de calage (1 an) qui peut paraître trop courte pour déterminer les 3 paramètres. Pour remédier à ce problème, au lieu de caler sur 1 an, nous avons répété la même opération en calant sur 2, 3, 4 ou 5 ans. Prenons l'exemple du calage sur une durée de 5 ans appliqué au même site que précédemment, à Fernow, et illustré ci-dessous (figure 12). On se place par exemple sur l'année hydrologique 1968. On cale non plus sur l'année hydrologique 1968 mais sur l'ensemble des années hydrologiques 1966 à 1970 et on contrôle toujours sur l'ensemble de la chronique ; en indice 1 on obtient un débit interannuel moyen 1.2 c'est-à-dire 20 % plus élevé que le débit avant traitement.

Le fait de caler sur une période relativement longue (par exemple 5 ans) permet de construire des courbes d'évolution moins bruitées, plus lissées que celles du calage- «contrôle» séquentiel 1 an.

Etant donné que la période de calage est glissante, cette méthode a été appelée "Calage-«contrôle» séquentiel glissant"



**Figure 12: Evolution relative à long terme du débit moyen reconstitué et des quantiles à Fernow 7/4, suite aux coupes d'hivers 1963-1964 et 1966-1967, obtenue grâce au Calage- «contrôle» séquentiel 5 ans, en indice 1**

Les méthodes que nous venons de présenter ont été appliquées sur 18 paires de bassins versants. Nous allons maintenant synthétiser les résultats obtenus.

## **Chapitre 4. SYNTHÈSE DES RESULTATS SUR 18 PAIRES DE BASSINS VERSANTS**

Dans cette partie, nous exposons les résultats de l'effet de pratiques forestières sur le débit pour 18 paires de bassins versants. Nous distinguerons l'influence à court terme des coupes, celle des coupes suivies d'application d'herbicides et l'influence à moyen voire long terme du boisement, par plantations ou par régénération de la forêt suite à des coupes.

### **4.1. Influence à court terme des coupes**

#### **4.1.1 Influence sur les débits courants**

Nous avons observé, grâce à la méthode du calage avant traitement-« contrôle » après traitement que, suite à une coupe à blanc, le débit journalier a tendance à augmenter, ce qui est particulièrement visible pour les étiages cf. paragraphe 3.3., exemple de Fernow 7/4.

Par ailleurs, grâce à la méthode du Calage- «contrôle» séquentiel 1 an (et 2 ans), on détecte de manière très nette pour chacune des paires de bassins versants dont le bassin traité subit une coupe à blanc une augmentation des débits faibles (quantile 0.2), mais aussi généralement des quantiles 0.5, 0.8 et de la moyenne. Nous exposons ci-dessous les résultats obtenus, à savoir l'augmentation du débit moyen reconstitué et des quantiles 0.2, 0.5 et 0.8 consécutive à une coupe à blanc, en % (indice 100) puis en mm par jour (ou par an pour le débit moyen). Il s'agit plus précisément de l'augmentation maximale observée durant les quelques années qui suivent la coupe (on a pris l'année où l'augmentation est la plus forte).

D'autre part, nous avons rajouté une colonne expliquant la confiance que l'on accorde aux résultats. Cette fiabilité tient compte d'une part de la valeur du coefficient de performance C2M en calage-contrôle préliminaire (avant-traitement) (cf paragraphe 3.2. et annexe 4), mais également des fluctuations des courbes non expliquées par les coupes (qu'on appelle généralement le "bruit" de la méthode). L'indicateur de fiabilité s'appuie aussi sur la dépendance de la relation débit-débit vis-à-vis des années sèches et des années humides: nous avons regardé, lorsque nous observons des fluctuations non expliquées, si elles correspondent à une année particulièrement sèche (ou humide).

	n°	( $\Delta Q_{\text{moy}}$ )max, en %	( $\Delta Q_{0,2}$ )max, en %	( $\Delta Q_{0,5}$ )max, en %	( $\Delta Q_{0,8}$ )max, en %	Fiabilité
Andrews	1	+ 50%	+ 170%	+ 100%	+ 60%	assez bonne
Fernow 1/4	3	+ 20%	+ 190%	+ 70%	+ 30%	assez bonne
Fernow 3/4	13	+ 20%	+ 150%	+ 60%	+ 30%	bonne
Fernow 6/4	15	+ 30%	+ 900%	+ 200%	+ 50%	mauvaise
Fernow 7/4	16	+ 20%	+ 400%	+ 100%	+ 30%	bonne
Hubbard Brook 2/3	4	+ 15%	+ 450%	+ 130%	+ 30%	assez bonne
Hubbard Brook 5/3	5	+ 10%	+ 90%	+ 40%	+ 15%	moyenne
Maroondah (Picaninny Creek)	17	+ 100%	+ 300%	+ 200%	+ 100%	mauvaise
Maroondah (Myrtle 2/Myrtle 1)	18	+ 40%	+ 50%	+ 42%	+ 35%	assez bonne

**Tableau 2 : Augmentation maximale du débit interannuel reconstitué et des quantiles 0.2, 0.5 et 0.8 des débits journaliers consécutive à une coupe à blanc, en % (indice 100)**

	n°	( $\Delta Q_{\text{moy}}$ )max, en mm/an	( $\Delta Q_{0,2}$ )max, en mm/jour	( $\Delta Q_{0,5}$ )max, en mm/jour	( $\Delta Q_{0,8}$ )max, en mm/jour	Fiabilité
Andrews	1	+ 584	+ 0,32	+ 1,07	+ 2,58	assez bonne
Fernow 1/4	3	+ 109	+ 0,04	+ 0,35	+ 0,60	assez bonne
Fernow 3/4	13	+ 130	+ 0,17	+ 0,52	+ 0,77	bonne
Fernow 6/4	15	+ 151	+ 0,45	+ 1,04	+ 0,92	mauvaise
Fernow 7/4	16	+ 157	+ 0,60	+ 1,09	+ 0,95	bonne
Hubbard Brook 2/3	4	+ 188	+ 0,86	+ 1,26	+ 0,94	assez bonne
Hubbard Brook 5/3	5	+ 86	+ 0,22	+ 0,42	+ 0,45	moyenne
Maroondah (Picaninny Creek)	17	+ 238	+ 0,72	+ 0,88	+ 0,95	mauvaise
Maroondah (Myrtle 2/Myrtle 1)	18	+ 306	+ 0,71	+ 0,79	+ 0,93	assez bonne

**Tableau 3 : Augmentation du débit moyen reconstitué et des quantiles 0.2, 0.5 et 0.8 consécutive à une coupe à blanc, respectivement en mm/an et en mm/jour**

Les résultats qui apparaissent les plus fiables sont ceux de Fernow : Fernow 7/4 et Fernow 3/4 : d'une part, le C2M avant-traitement était excellent et d'autre part les courbes des quantiles et de la moyenne se caractérisent par peu de "bruit". D'après la méthode de Calage-«contrôle» séquentiel 1 an, à Fernow 7/4, les coupes à blanc ont provoqué une augmentation très importante des débits d'étiage (les débits faibles reconstitués ont été multipliés par 5, soit une augmentation de 0.6 mm/jour) ainsi qu'une augmentation de 20 % du débit moyen, soit 160 mm/an. L'augmentation relative s'amointrit pour les plus forts quantiles, ce qu'on observe d'ailleurs sur tous les sites. A Fernow 3/4, les débits faibles ont été multipliés par 2.5 suite à la coupe à blanc (soit +0.2 mm/jour) et la moyenne a augmenté de 20 %, soit 130 mm/an..

A Fernow 1/4, même si les résultats sont moins fiables que les précédents, l'augmentation du débit moyen (mesuré vs reconstitué) paraît être là encore de 20 % (néanmoins, le débit moyen fluctue un peu trop, même en dehors de la période de coupe, pour quantifier l'effet avec précision). Pour l'augmentation des débits faibles, il semblerait qu'il ne faut pas raisonner en valeur relative mais plutôt en valeur brute, en mm/jour pour les quantiles et mm/an pour la moyenne. Toutefois, même en valeur brute, l'augmentation est très variable selon le bassin versant considéré. A Andrews, le débit moyen reconstitué augmente de 50 %, soit près de 580 mm/an. Toutefois, bien que l'on assiste à une augmentation très nette de la moyenne et de tous les quantiles suite à la coupe, on observe 2 pics après la coupe au lieu d'un seul, ce qui semble surprenant, et pas mal de « bruit » (de l'ordre de grandeur de la moitié de l'effet de la coupe, et cela quel que soit le quantile).

A Hubbard Brook 2/3, les résultats sont assez fiables également même si, là encore, ils ne sont pas sans "bruit" ; le débit moyen reconstitué s'est accru de 15 %, soit près de 90 mm/an.

A Maroondah (Myrtle 2/Myrtle 1) l'augmentation de débit est estimée à 40 % soit 310 mm/an. Cependant, la confiance que l'on accorde aux résultats de Maroondah (Myrtle 2/Myrtle 1) n'est pas aussi importante que celle que l'on pourrait penser par la seule lecture du C2M avant-traitement. En effet, des problèmes de saisonnalité interviennent: la relation débit-débit convient mal en été. Par ailleurs, l'Australie se caractérise par des phénomènes climatiques cycliques et une alternance marquée d'années sèches et d'années humides.

A Hubbard Brook, la paire 5/3 fournit une augmentation apparente de 10 % mais elle est de l'ordre de grandeur du "bruit" de la méthode.

Les autres paires de bassins versants ne sont pas fiables. En effet, à Fernow 6/4, on note la présence de trop de variations de tous les quantiles en dehors de la période de coupes ; l'augmentation de la moyenne semblerait plus fiable mais on observe un palier haut alors qu'on s'attendrait à ce que le débit revienne à son état initial. Enfin à Maroondah (Picaninny Creek/Slip Creek), la confiance a priori était déjà médiocre: le C2M avant-traitement n'était pas constant lorsque l'on intervertissait les 2 demi-périodes avant-traitement. Et par ailleurs on remarque trop de « bruit » sur la courbe générée par la méthode de Calage- «contrôle» séquentiel 1 an appliquée à Maroondah (Picaninny Creek/Slip Creek) ; la courbe générée par la méthode de Calage- «contrôle» séquentiel 2 ans est meilleure, moins "chaotique", mais le pic est lissé, ce qui ne peut pas nous fournir le maximum.

La Figure 13 présente l'évolution des résultats en fonction de l'indice d'aridité.

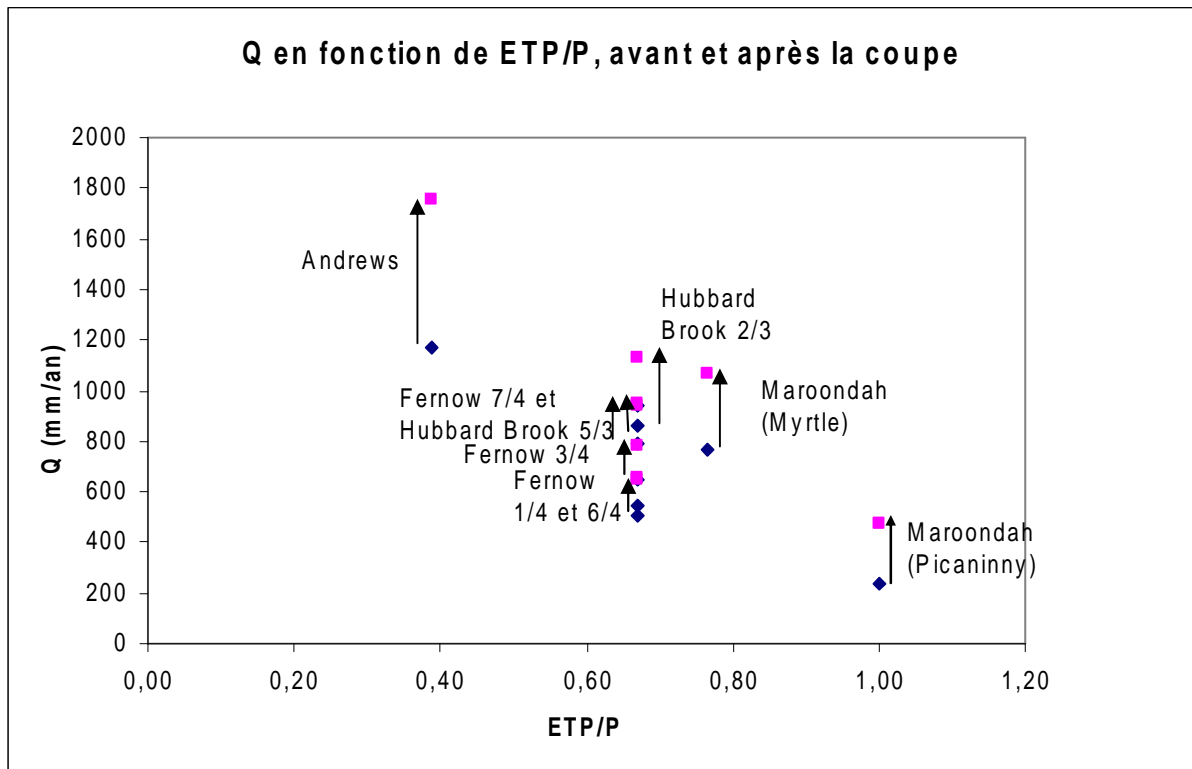


Figure 13 : Evolution du débit moyen reconstitué Q suite à la coupe : les points bleus correspondent à la situation avant la coupe et les points roses à la situation juste après la coupe (l'année où l'on observe le débit reconstitué maximal). En abscisse est indiqué l'indice d'aridité ETP/P, ETP désignant l'évapotranspiration potentielle et P la pluie

Ce graphique ne permet pas de conclure quant à une relation simple entre l'indice d'aridité et l'effet de la coupe.

Par contre, comme nous allons le voir en figure 14, le déficit d'écoulement apparaît comme une variable explicative de la variation du débit consécutif à la coupe. En effet, le graphique ci-dessous semble soutenir l'assertion de Cosandey (2003), qui écrivait : "plus le déficit hydrique est grand [...] plus la végétation forestière aura tendance à réduire l'écoulement" et donc la coupe à augmenter l'écoulement.

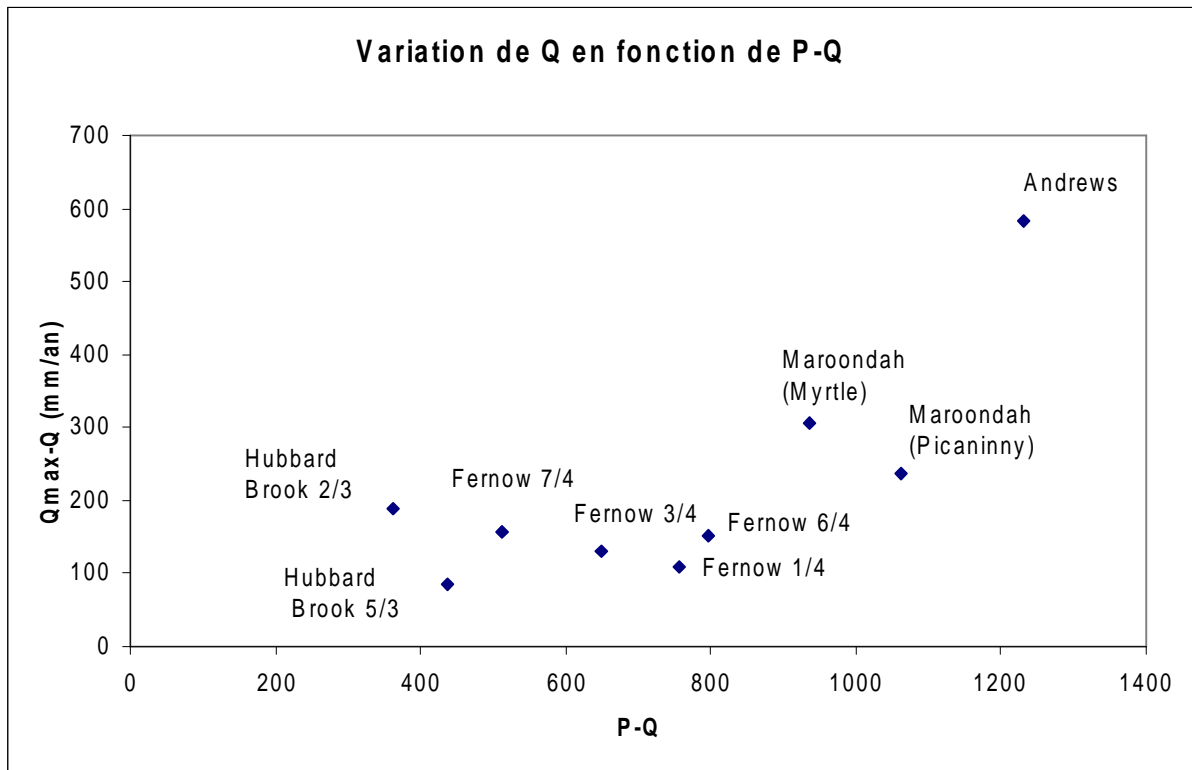


Figure 14 : Variation maximale du débit interannuel reconstitué (mm/an) observée suite à la coupe en fonction du déficit d'écoulement annuel P-Q

#### 4.1.2 Influence sur les crues

Par ailleurs, nous nous sommes intéressés à l'influence à court terme des coupes sur les débits importants (quantile 0.95) grâce à la méthode du calage-« contrôle » séquentiel, le calage étant alors effectué sur le débit  $Q$  et non plus sur  $\sqrt{Q}$  (afin de mieux prendre en compte les forts débits lors du calage). On obtient une augmentation du quantile 0.95 significative pour les paires de bassins versants suivantes : Fernow 3/4 et 7/4, Hubbard Brook 2/3 et Maroondah Myrtle 2/Myrtle 1. En effet, pour ces paires de bassins versants, on observe un pic du quantile 0.95 reconstitué jamais atteint auparavant et qui n'a ensuite jamais plus été observé ! Pour les autres paires de bassins versants, on observe toujours une tendance à la hausse (dans aucun des cas, on n'observe de diminution du quantile 0.95 suite à la coupe) mais celle-ci est contenue dans le "bruit" de la méthode. On peut se poser ensuite la question de ce qui est responsable de cette augmentation: est-ce la moindre interception, la moindre évapotranspiration ou le fait d'avoir parfois tracé des routes ou des chemins qui ont privilégié l'écoulement de surface à de l'infiltration, ou encore le tassement du sol suite au passage des engins ou au transport des arbres coupés (Reinhart, 1963)?

## 4.2. Influence des coupes suivies d'applications d'herbicides

- Cas de Fernow 7/4

L'augmentation du débit interannuel reconstitué suite aux coupes dure une quinzaine d'années après la deuxième coupe. Par contre l'augmentation des étiages n'est pas durable, malgré l'application d'herbicides.

- Cas de Hubbard Brook 2/3

Nous montrons ci-dessous l'évolution du débit moyen et des quantiles reconstitués par la méthode du Calage- «contrôle» séquentiel 2 ans à Hubbard Brook 2/3. La coupe à blanc a eu lieu en hiver 1965 et l'application d'herbicides de 1966 à 1968 (inclue).

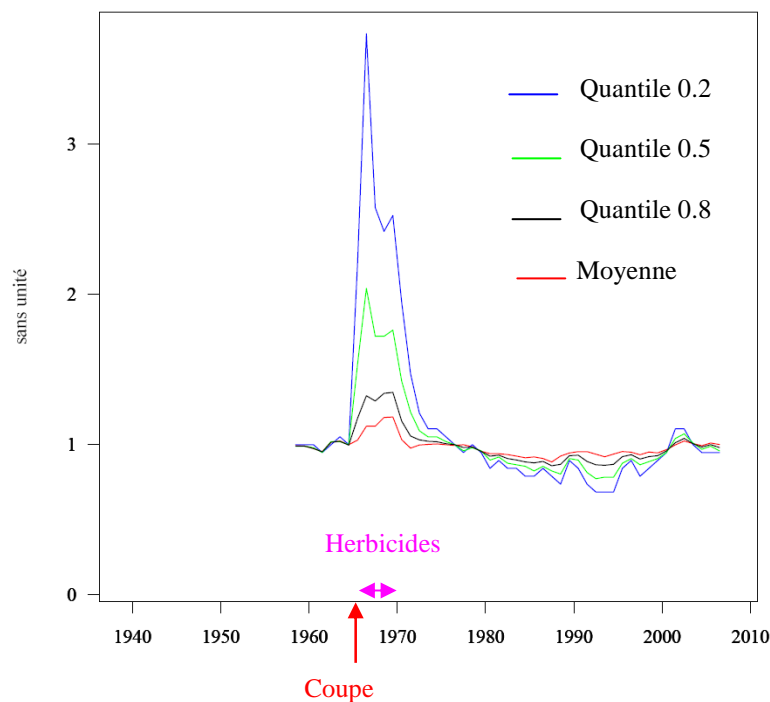


Figure 15: Méthode du Calage- «contrôle» séquentiel 2 ans (glissant) appliquée à Hubbard Brook 2/3

Les résultats sont intéressants et relativement fiables. En effet, le coefficient de performance C2M préliminaire (obtenu lorsque l'on a divisé la période avant-traitement en 2 périodes, l'une de calage, l'autre de contrôle et calculé le C2M au contrôle) était excellent (0.96 lorsque l'on a calé et contrôlé sur la racine carrée du débit). Et on remarque que la variation (l'augmentation pour les quantiles 0.2, 0.5 et 0.8 reconstitués) consécutive à la coupe est très nettement supérieure à la variabilité "naturelle". L'augmentation du débit moyen reconstitué peut être évaluée à +20%. Néanmoins, des doutes subsistent quant à la quantification de l'effet de la coupe et des herbicides sur les débits faibles. En effet, les débits faibles (reconstitués) évoluent fortement durant la période d'application d'herbicides, d'une année – de calage – à l'autre). Les herbicides semblent prolonger tant bien que mal l'effet de la coupe, sans vraiment y parvenir. Cette prolongation de l'effet de la coupe dépend du quantile considéré.

Remarque : pour les étiages, on peut caler sur  $\ln Q$  au lieu de  $\sqrt{Q}$ , ce qui permet de mieux prendre en compte les faibles débits lors du calage. On obtient une courbe du même type :

l'augmentation du quantile 0.2 consécutive à la coupe n'est pas stabilisée par l'application d'herbicides ; malgré leur application, on observe un retour rapide à l'état initial.

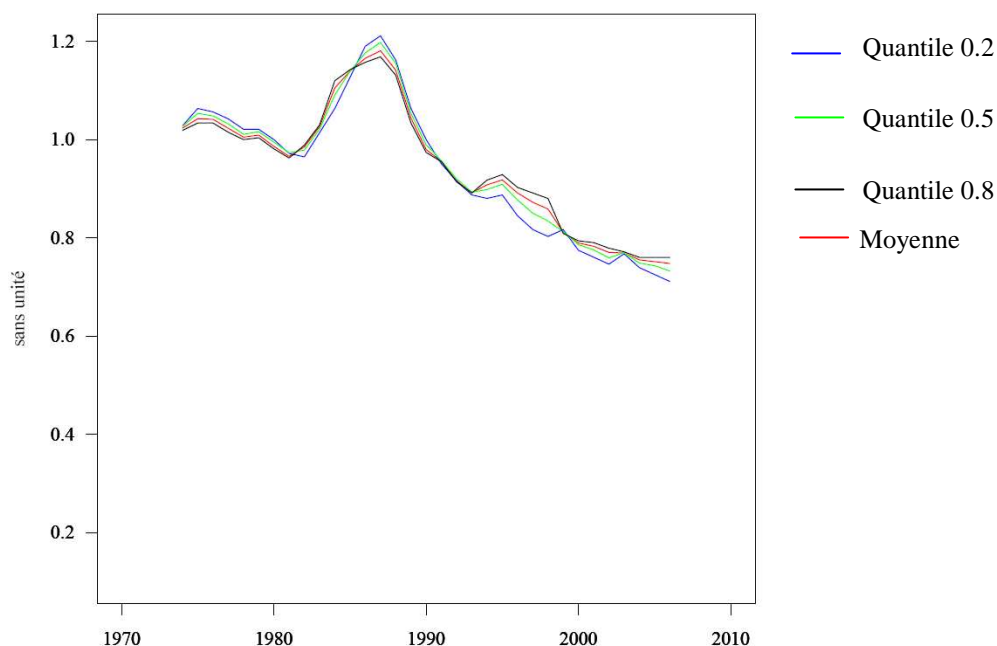
Nous avons étudié également des paires de bassins versants dont le bassin traité subit un incendie suivi d'herbicides. C'est le cas de Three Bar B/D et Three Bar C/D. Toutefois, le C2M du calage-contrôle préliminaire était moyen voire mauvais. Cela peut s'expliquer par la non stationnarité de l'évolution du couvert végétal de chacun des 2 bassins versants (du bassin traité, mais également du bassin de contrôle) qui induit naturellement une non stationnarité de la relation débit-débit. En effet, le bassin de contrôle a subi lui aussi l'incendie (accidentel) de 1959 (même s'il n'a pas eu d'herbicides). L'autre explication possible est la variabilité climatique élevée (même si le comportement hydrologique des bassins versants serait censé en être indépendant). Tout cela fait que l'on constate une variabilité importante du débit interannuel reconstitué et des quantiles : le "bruit" est trop important pour pouvoir se risquer à une interprétation.

### **4.3. Influence à long terme des coupes (régénération de la forêt après la coupe)**

Des chercheurs australiens ont mis en évidence un comportement qui semblait particulier aux peuplements d'Eucalyptus ; si on observe bien l'augmentation 'classique' du débit annuel immédiatement après la coupe, par la suite, c'est une réduction sensible de ce dernier qui est observée, s'expliquant par la plus grande évapotranspiration des jeunes arbres par rapport aux vieux. Puis, avec le vieillissement, l'activité diminue. D'où l'apparition d'un minimum au bout de quelques dizaines d'années et une remontée progressive du débit annuel. Cette évolution, caractérisée par une courbe décroissante est bien connue en Australie sous le nom de *courbe de Kuczera*. cf. figure 16

Les résultats que nous obtenons par la méthode des bassins versants appariés appliquée à la paire de bassins versants de Maroondah Myrtle 2/Myrtle 1 viennent conforter ces assertions : suite à la coupe, après une augmentation de courte durée, le débit moyen (reconstitué) et les quantiles diminuent à un niveau plus bas que le niveau initial. Néanmoins, nous ne bénéficions pas d'une chronique suffisamment longue pour savoir où se situe (temporellement) le minimum. Par ailleurs, les résultats que nous obtenons sont de fiabilité moyenne. En effet, même si la valeur du C2M avant-traitement était bonne, il existe des problèmes de saisonnalité et de cyclicité (alternance d'années sèches et d'années humides).





**Figure 16 : Evolution à long terme du débit moyen reconstitué et des quantiles à Maroondah, Australie (Myrtle 2/Myrtle 1) suite à la coupe à blanc à 74 % du bassin versant Myrtle 2 au début des années 1980 (graphe obtenu grâce à la méthode du Calage- «contrôle» séquentiel 5 ans)**

En ce qui concerne la paire de bassins versants Picaninny Creek/Slip Creek (à Maroondah également), la fiabilité n'est pas assez bonne pour conclure.

Mais cet effet "Kuczera" est-il propre aux bassins versants d'Australie ?

Nous avons essayé de répondre à cette question en appliquant la méthode du Calage-«contrôle» séquentiel 5 ans sur les autres bassins versants ayant subi des coupes en distinguant l'effet à long terme sur le débit moyen et sur les étiages. On remarque un effet Kuczera sur les débits faibles pour les sites de Fernow 3/4 (-30 %, au bout de 25 ans), Fernow 7/4 (-20 %, au bout de 35 ans), Hubbard Brook 2/3 (-30 %, au bout de 30 ans) et Hubbard Brook 5/3 (-10 %). Et un minimum pour le débit moyen pour Fernow 3/4 (-8 % environ, soit -50 mm/an, au bout de 25 ans). A Hubbard Brook 2/3, la réduction apparente de 5 % environ n'est peut-être pas significative. A Andrews et Fernow 7/4, Fernow 1/4, le débit moyen (reconstitué) revient à sa valeur initiale sans passer par un minimum.

On retiendra donc que l'effet Kuczera est observé généralement pour les étiages, le minimum étant atteint une trentaine d'années après la coupe. Pour le débit moyen, c'est très variable.

#### 4.4. Influence des plantations

	n°	( $\Delta Q_{\text{moy}}$ )max, en %	( $\Delta Q_{0,2}$ )max, en %	( $\Delta Q_{0,5}$ )max, en %	( $\Delta Q_{0,8}$ )max, en %
Coshocton	2	-30%	-70%	-60%	-45%
Mokobulaan A/C	6	-100%	-100%	-100%	-100%
Mokobulaan B/C	7	-100%	-100%	-100%	-100%

**Tableau 4 : Diminution du débit moyen reconstitué et des quantiles 0.2, 0.5 et 0.8 consécutive aux plantations, en % (indice 100)**

Les sites étudiés bénéficiant de plantations sont Coshocton en Ohio et Mokobulaan en Afrique du Sud. A Coshocton, le débit moyen (reconstitué) passe par un minimum (ou un palier?) entre 20 et 25 ans après la plantation et qui correspond à une réduction de 30 %, soit 110 mm/an. Quant aux étiages, ils atteignent leur minimum plus tôt, au bout d'une quinzaine d'années, ce qui représente une diminution de 70 %. Ce décalage dans le temps est difficile à expliquer.

A Mokobulaan, le bassin versant boisé en *Eucalyptus grandis* en février 1969 voit le débit diminuer significativement à partir de 1973 (soit 4 ans après les plantations) et la rivière s'assèche complètement en 1977 (soit 8 ans après les plantations). De même, le bassin versant boisé en pins en janvier 1971 voit le débit diminuer significativement à partir de 1975 (soit 4 ans après les plantations) et la rivière s'assèche complètement en 1982 (soit 11 ans après les plantations).

## Chapitre 5. DISCUSSION

### 5.1. Comparaison avec les études pluie-débit effectuées à Coshocton (Ohio)

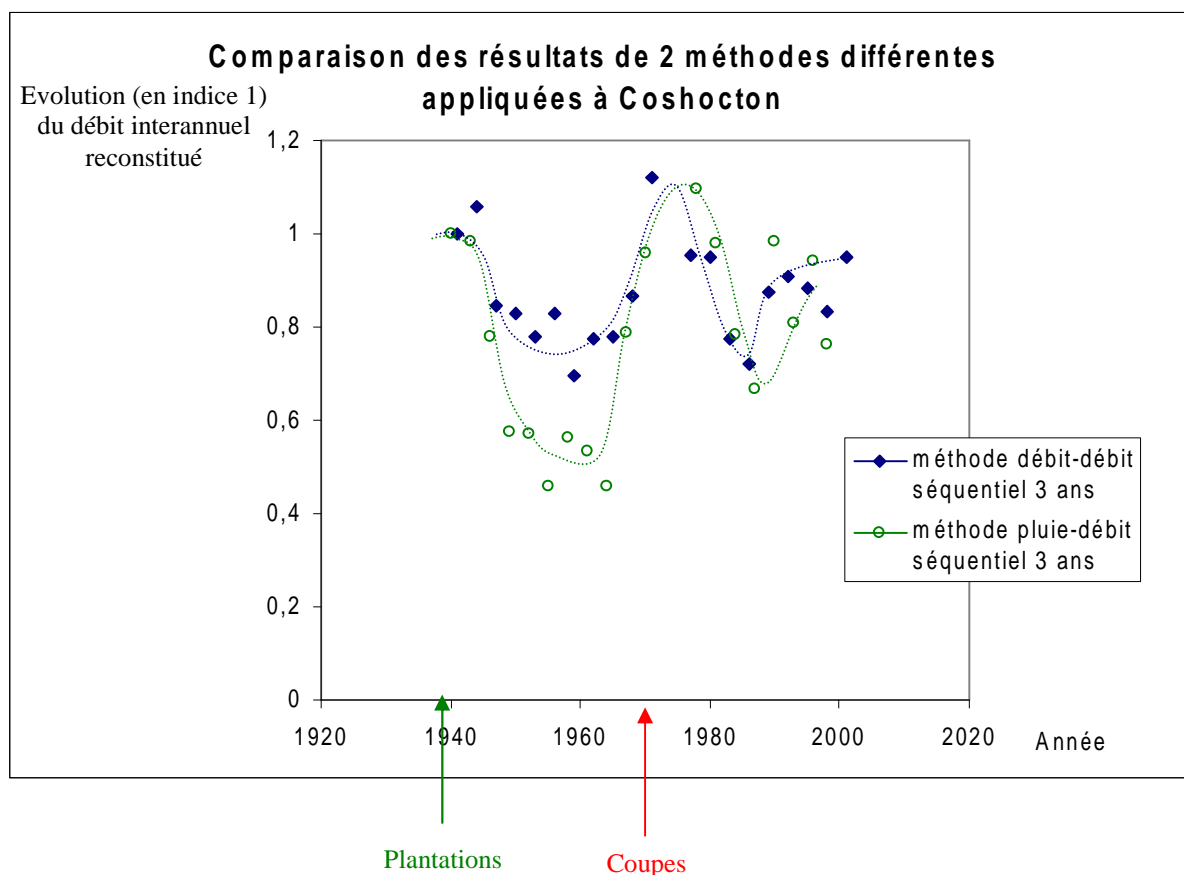


Figure 17: Evolution en indice 1 du débit interannuel reconstitué selon 2 méthodes différentes: la méthode débit-débit séquentiel-3ans utilisée lors du stage (points bleus) et la méthode pluie-débit séquentiel-3ans (points verts)

Les plantations de Coshocton ont eu lieu en 1938 et 1939 (plantations de pins sur 70 % de la surface). Les 2 méthodes mettent en évidence une tendance à une diminution du débit pendant les 20 ou 25 ans qui suivent les plantations. Néanmoins, l'évaluation de l'ampleur de l'effet est sensiblement différente d'une méthode à l'autre, la baisse maximale observée par la méthode débit-débit séquentiel-3ans étant de 30 % alors qu'elle serait de 54 % selon la méthode pluie-débit séquentiel-3ans. En ce qui concerne l'influence des coupes des hivers 1967 à 1969, les deux méthodes rendent compte d'une augmentation du débit à un niveau légèrement supérieur au niveau initial avant plantations.

## 5.2. Comparaison avec les résultats de la littérature, pour l'ensemble des sites

En annexe 5, nous redonnons l'augmentation du débit moyen observée suite aux coupes, en pourcentage par rapport au débit initial, respectivement d'après nos calculs effectués lors du stage (1<sup>ère</sup> colonne) et d'après la littérature (2<sup>ème</sup> colonne). La méthode utilisée par chacun des auteurs varie, quoiqu'en général il s'agisse de calculs faits au pas de temps annuel avec une relation linéaire entre le débit du bassin de référence et le débit du bassin traité.

Sans rentrer dans les détails, on observe des différences non négligeables concernant la quantification de l'effet à court terme d'une coupe sur certains sites (Hubbard Brook 2/3 et surtout 5/3, Andrews) alors que pour d'autres, les résultats sont à peu de choses près identiques. Essayons de trouver des explications possibles des différences.

En ce qui concerne Hubbard Brook, des problèmes d'extrapolation ont été rencontrés. Comme l'explique Hornbeck, "pendant les 44 mois qui ont suivi le traitement, 12 valeurs de débits mensuels du bassin de contrôle sont tombées en dehors de la gamme rencontrée lors de la calibration [...] Au moins trois des débits mensuels étaient assez importants pour être classés dans la catégorie des événements extrêmes" (Hornbeck, 1973). Par la méthode débit-débit, avec un modèle affine, ils ont obtenus une augmentation de 41 % pour Hubbard Brook 2/3 et 23 % pour Hubbard Brook 5/3. Ce qui est à noter, c'est que les résultats sont différents même d'un modèle débit-débit à l'autre, d'où la nécessité de bien choisir son modèle débit-débit. Pour Hubbard Brook, il semblerait finalement qu'aucune des méthodes ne soient fiables à cause du problème d'extrapolation cité précédemment. Toutefois, il est possible que la relation débit-débit que nous avons utilisé soit moins sensible aux problèmes d'extrapolation qu'un modèle pluie-débit, ce qui pourrait expliquer que, malgré les problèmes d'extrapolation, on obtienne des résultats apparemment cohérents, proches de ceux observés à Fernow.

### 5.3. Avantages et limites de la méthode des bassins versants appariés

Comparée à la méthode pluie-débit, la méthode des bassins versants appariés présente l'avantage conséquent de s'affranchir de l'imprécision des estimations de pluie et de la non linéarité très prononcée de la relation pluie-débit. En testant sur un millier de bassins versants français, on obtient (pour un calage et un contrôle sur la racine carrée du débit) une valeur du coefficient de performance légèrement supérieure à celle du modèle pluie-débit GR4J. La confiance que l'on accorde a priori au modèle débit-débit présenté dans ce rapport et utilisé lors du stage est donc meilleure que celle de GR4J.

Néanmoins, qu'il s'agisse d'un modèle pluie-débit ou d'un modèle débit-débit, des difficultés sont rencontrées pour les bassins versants secs comme le Réal Collobrier ou Three Bar notamment lorsqu'il s'agit de reconstituer des années humides à partir d'années sèches et vice versa. Le caractère intermittent du débit pose problème également.

Par ailleurs, le fait que le modèle fasse apparaître une puissance peut étonner. On pourrait s'inquiéter d'une possible surestimation des forts débits, notamment lorsque l'exposant est supérieur à 1. Toutefois la puissance reste proche de 1. Le fait de caler sur la racine carrée des débits permet de donner un poids plus important aux débits moyens et donc de mieux simuler les débits moyens mais présente l'inconvénient de ne pas être véritablement adaptée aux forts débits qui, eux, sont moins bien simulés. Pour l'étude des très forts débits (quantiles 0.95), nous avons dû opérer un calage sur le débit et non plus sur sa racine carrée. Mais cela ne nous met pas à l'abri d'un réel risque d'extrapolation (simulation de débits importants en périodes de reconstitution qui n'avaient jamais été observés en période de calage).

D'autre part, on pourrait se poser la question du choix du modèle débit-débit. Comme nous l'avons expliqué dans le paragraphe 3.1. consacré à la recherche du "meilleur" modèle débit-débit, dans le cadre du stage, nous avons opté pour le modèle 15 qui, comme le modèle 2, est un modèle en puissance, avec en outre un décalage temporel. Ce choix se justifie par le faible nombre de paramètres de ce dernier et par son indice de performance C2M bon comparé à d'autres modèles (débit-débit ou pluie-débit). Toutefois, au lieu de faire appel au modèle 15, il serait possible d'utiliser le modèle 34 qui est un peu plus performant cf.annexe 3. Il serait même envisageable de concevoir des modèles plus élaborés qui feraient intervenir à la fois le débit (de la rivière d'à côté) et la pluie, modèles que l'on pourrait appeler "modèles pluie-débit - débit". On pourrait même y ajouter une saisonnalité, ce qui serait recommandé notamment pour la paire de bassins versants Myrtle 2/Myrtle 1 de Maroondah, marqués par une forte saisonnalité dans leur relation débit-débit. Cependant, il faudra alors vérifier que les résultats obtenus ne sont pas un artefact dû au modèle.

Concernant la méthode du calage avant-traitement – « contrôle » (ou plutôt reconstitution) après traitement, même s'il est relativement facile de détecter l'influence des coupes, des difficultés surviennent quant à leur quantification. Même avec un indice de performance C2M avant traitement élevé, les faibles débits de la période estivale ne sont pas toujours bien simulés même en période de calage, et cela même en calant sur  $\ln Q$ .

Au sujet de la méthode du calage-« contrôle » séquentiel, concernant l'effet à court terme des coupes, on peut considérer qu'un an de calage est trop court. Cependant, la non-stationnarité qui suit immédiatement la coupe est mal rendue si l'on cale sur 2 ans (Calage- «contrôle» séquentiel 2 ans) car cela revient à lisser les pics qui peuvent représenter la réalité.

Concernant l'effet à long terme des coupes, nous avons préféré caler sur 5 ans (méthode du Calage- «contrôle» séquentiel 5 ans) car cela permet de mieux s'affranchir des particularités de certaines années qui ne seraient pas forcément représentatives (années très sèches ou au contraire très humides). Cependant, cela lisse les courbes, la question étant de savoir si ce lissage est un *artefact* ou, au contraire, une *réduction désirable du bruit* lié à la méthode, atteinte grâce à la prise en compte d'un plus grand nombre d'années.

On pourrait aussi s'interroger sur la validité de la méthode du calage-« contrôle » séquentiel. Rappelons que cette méthode consiste à reconstituer le débit journalier sur l'ensemble de la chronique à partir de la relation débit-débit calée sur quelques années (et qui est censée caractériser l'état des bassins versants ces années-là). On en déduit les quantiles et le débit interannuel qu'on aurait observé si tout se passait comme dans la période de calage. Cette méthode repose sur le postulat que le jeu de paramètres  $X_1$ ,  $X_2$  et  $X_3$  caractérise pleinement la relation statistique entre le débit des 2 rivières.

On pourrait prendre l'analogie du patrimoine génétique du blé : supposons qu'il existe une variété de blé dont l'ADN lui permette de pousser très bien lors des années humides. En années sèches, on n'observerait pas de différence avec les blés ordinaires. D'où l'intérêt de considérer à la fois des années sèches et des années humides en période de "contrôle" ou plus exactement de reconstitution. 2 variétés de blé ne pourront être distinguées que dans les mêmes conditions. De même, le jeu de paramètres  $X_1$ ,  $X_2$  et  $X_3$  de chaque année doit être appliqué sur l'ensemble de la chronique (et qui sera la même pour toutes) pour permettre une comparaison sur un grand nombre d'années (c'est bien d'ailleurs ce que nous avons fait).

Un doute subsiste néanmoins quant à la possibilité de déterminer pendant les années de calage (dont l'étendue est, nous l'avons vu, de 1 an, 2 ou 5 ans) – qui présentent toujours certaines particularités – la "substantifique moelle" de la relation débit-débit qui pourrait s'appliquer ensuite à toute période, quelle que soient ses particularités. Cela suppose que l'on croie vraiment à la qualité du modèle choisi. D'où l'intérêt qu'il y aurait à chercher un modèle plus fin tout en étant robuste (à la fois par rapport aux bassins versants et, pour un bassin versant donné, aux fluctuations climatiques). A cela, il est possible de répondre qu'il suffit que le modèle ne soit pas trop dépendant des conditions climatiques des années de calage. Déjà, le modèle en puissance est moins dépendant que le modèle linéaire : les courbes se caractérisent par moins de "bruit". Mais il est vrai qu'il ne reste pas insensible aux particularités des années sèches et humides.

## CONCLUSION

Le but de ce travail était de détecter et de quantifier l'influence du boisement ou du déboisement sur le débit des rivières grâce à la méthode des bassins versants appariés au pas de temps journalier. Contrairement à ce qui est la tradition dans l'équipe d'accueil, nous n'avons pas fait appel à un modèle pluie-débit (comme le modèle GR4J), mais à un modèle débit-débit qui est légèrement plus performant dans le sens où la somme des carrés des erreurs au contrôle en régime stationnaire est moindre. Contrairement à d'autres études effectuées notamment aux Etats-Unis, nous avons appliqué le modèle non pas au pas de temps annuel ou mensuel mais au pas de temps journalier. L'idée a été d'exprimer le débit journalier de la rivière d'un bassin versant A en fonction du débit journalier d'un bassin versant B similaire. En appliquant cette technique à des bassins versants forestiers expérimentaux, on peut décrire au pas de temps journalier l'évolution des débits de bassins versants ayant subi une modification de couvert végétal.

La première méthode utilisée a été celle du **Calage avant-traitement - reconstitution après-traitement** : après avoir vérifié (grâce à un calage-contrôle préliminaire) que le modèle se comportait bien hors-traitement, nous avons calé les 3 paramètres du modèle débit-débit sur la période avant-traitement, puis simulé (reconstitué) celui qu'on aurait observé s'il n'y avait pas eu de traitement (i.e. si le traitement n'avait pas eu d'effet). En comparant la courbe du débit mesuré et celle du débit reconstitué, nous avons constaté une influence importante des coupes en particulier sur les faibles débits estivaux. L'un des cas les plus probants est celui de Fernow 7/4 pour lequel on observe, suite à la coupe, une reprise de l'écoulement en été-début automne plus hâtive.

Ensuite, par la méthode du **Calage-«contrôle» séquentiel 1 an**, nous avons tenté de "figer" (de "prendre en photographie" si l'on peut dire) la relation débit-débit qui s'est réellement réalisée chaque année et, avec le jeu de paramètres de cette année-là, de reconstituer le débit que l'on aurait observé sur l'ensemble de la chronique si la relation débit-débit était restée figée à celle de l'année considérée. Effectuant cela chaque année, cela nous a donné la courbe d'évolution du débit moyen et des quantiles (reconstitués) au cours du temps. Et en comparant à la valeur d'avant-traitement, cela nous a donné l'évolution relative. Nous rendant compte qu'un an de calage était un peu court, nous avons élargi la durée de la période de calage glissante à 2 ans et 5 ans, ce qui nous a permis d'obtenir des courbes moins "bruitées" pour mieux visualiser les tendances à long terme.

Les résultats du stage viennent conforter les assertions suivantes : le boisement et le déboisement ont une influence non négligeable sur le débit des rivières à l'exutoire du bassin versant reboisé ou déboisé. Le boisement induit une diminution du débit annuel et des différents quantiles. En particulier, le boisement diminue les étiages, pouvant provoquer l'assèchement complet du cours d'eau (cas de Mokobulaan en Afrique du Sud), ce qui a été observé de manière très nette grâce à la méthode classique du calage avant-traitement - reconstitution après-traitement. Inversement, la coupe provoque une augmentation du débit annuel (qui peut dépasser les 20 %) et de l'ensemble des quantiles (y compris les crues courantes) durant les quelques années qui suivent la coupe. Cependant, l'effet est très variable, il dépend de différents autres facteurs, en particulier la pluie annuelle, la pluie des années suivant la coupe... Il semblerait néanmoins que les résultats des paires de bassins versants étudiés lors du stage mettent en évidence que "plus le déficit hydrique est grand, les réserves en eau du sol abondantes [...] et plus la végétation forestière aura tendance à réduire

l'écoulement" (Cosandey, 2003). D'autre part, à long terme (au bout de 30 ans environ), on peut observer une décroissance non négligeable du débit annuel et surtout des faibles débits, ce qui peut s'expliquer par la plus forte activité des arbres relativement jeunes comparés aux vieux, mais également par la moindre résistance stomatique des espèces nouvellement installées.

Comme nous l'avons précisé, la méthode des bassins versants appariés présente des avantages et des inconvénients. Elle semblerait moins sensible aux variations climatiques qu'un modèle pluie-débit. Pourtant, le modèle débit-débit utilisé lors du stage est inadapté à certains bassins versants secs comme le Réal Collobrier ou Three Bar.

Mis à part ces deux derniers sites pour lesquels la méthode n'est pas applicable, les résultats obtenus pour la majorité des paires de bassins versants sont probants. Par l'analyse des courbes de Coshocton, on constate même que l'effet des plantations et celle de la régénération de la forêt consécutive à la coupe (comparée à l'état juste après la coupe) sont, dans une certaine mesure, similaires, ce qui n'était pas observé par le modèle pluie-débit et qui semble pourtant assez intuitif.

Il serait souhaitable que des études supplémentaires sur la fiabilité des méthodes débit-débit et pluie-débit soient réalisées, ainsi qu'une recherche d'un modèle plus performant moins dépendant de la variabilité climatique. Une importance particulière devra être accordée à la saisonnalité et la cyclicité des années sèches et des années humides en Australie.

Enfin, les résultats présentés dans ce rapport concernent le débit à l'exutoire immédiat de bassins versants forestiers traités de petite taille. Ceux-ci ne sont a priori pas transposables à des échelles plus importantes car il faudrait prendre en compte l'influence de la forêt sur le climat ainsi que d'autres effets d'échelle.



## TABLE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 1 : La forêt de Fernow (Virginie Occidentale) .....	1
Figure 2: Le Réal Collobrier à Collobrières.....	2
Figure 3: Bilan hydrique de la partie aérienne (source: Humbert J. et Najjar G., 1992) .....	4
Figure 4: Explication de la technique des bassins versants appariés.....	7
Figure 5: Q/P en fonction de P/ETP pour les 8 sites considérés .....	8
Figure 6: Distribution des performances au contrôle des 34 formules testées (critère de performance utilisé : C2M sur la racine des débits ; échantillon de bassins : 1039 bassins versants français.) Chaque croix rouge correspond à la moyenne, les ronds bleus au minimum et maximum, les traits aux quantiles 0.1, 0.25, 0.5, 0.75 et 0.9. Le classement des formules a été effectué par ordre croissant selon la moyenne.....	12
Figure 7 : Calendrier des opérations de coupe sur le bassin versant n°7 de Fernow	14
Figure 8 : Débit journalier simulé (courbe rouge) et mesuré (courbe bleue) une année donnée de la période de calage (Calage sur la racine-carrée du débit), du 1 <sup>er</sup> octobre 1957 au 1 <sup>er</sup> octobre 1958. NB: lorsque la courbe bleue n'est pas visible, c'est qu'elle est cachée derrière la courbe rouge (superposition des deux courbes) .....	14
Figure 9: Débit journalier simulé (courbe rouge) et mesuré (courbe bleue) une année donnée de la période de contrôle (Calage sur la racine-carrée du débit), du 1 <sup>er</sup> octobre 1968 au 1 <sup>er</sup> octobre 1969.....	15
Figure 10 : Evolution du débit interannuel reconstitué (ramené à 1an), pour une période de calage de 1 an d'étendue: méthode du Calage- «contrôle» séquentiel 1 an appliquée à Fernow 7/4 .....	17
Figure 11 : Evolution relative des quantiles (en indice 100) à Fernow 7/4. Les courbes bleue, verte et noire et rouge correspondent respectivement aux quantiles 0.2, 0.5, 0.8 et à la moyenne (pour un calage sur la racine carrée des débits) .....	18
Figure 12: Evolution relative à long terme du débit moyen reconstitué et des quantiles à Fernow 7/4, suite aux coupes d'hivers 1963-1964 et 1966-1967, obtenue grâce au Calage- «contrôle» séquentiel 5 ans, en indice 1 .....	19
Figure 13 : Evolution du débit moyen reconstitué Q suite à la coupe : les points bleus correspondent à la situation avant la coupe et les points roses à la situation juste après la coupe (l'année où l'on observe le débit reconstitué maximal). En abscisse est indiqué l'indice d'aridité ETP/P, ETP désignant l'évapotranspiration potentielle et P la pluie.....	23
Figure 14 : Variation maximale du débit interannuel reconstitué (mm/an) observée suite à la coupe en fonction du déficit d'écoulement annuel P-Q .....	24
Figure 15: Méthode du Calage- «contrôle» séquentiel 2 ans (glissant) appliquée à Hubbard Brook 2/3 .....	25
Figure 16 : Evolution à long terme du débit moyen reconstitué et des quantiles à Maroondah, Australie (Myrtle 2/Myrtle 1) suite à la coupe à blanc à 74 % du bassin	

versant Myrtle 2 au début des années 1980 (graphe obtenu grâce à la méthode du Calage- «contrôle» séquentiel 5 ans) .....	27
Figure 17: Evolution en indice 1 du débit interannuel reconstitué selon 2 méthodes différentes: la méthode débit-débit séquentiel-3ans utilisée lors du stage (points bleus) et la méthode pluie-débit séquentiel-3ans (points verts).....	29
Figure 18 : Débit journalier simulé pour un calage sur le débit (courbe rouge) et mesuré (courbe bleue) une année donnée de la période de calage, du 1 <sup>er</sup> octobre 1956 au 1 <sup>er</sup> octobre 1957 (Fernow 7/4) .....	40
Figure 19: Débit journalier simulé pour un calage sur la racine carrée du débit (courbe rouge) et mesuré (courbe bleue) du 1 <sup>er</sup> octobre 1956 au 1 <sup>er</sup> octobre 1957 (Fernow 7/4) .....	40
Figure 20: Débit journalier simulé pour un calage sur le logarithme népérien du débit (courbe rouge) et mesuré (courbe bleue) du 1 <sup>er</sup> octobre 1956 au 1 <sup>er</sup> octobre 1957 (Fernow 7/4) .....	40
Figure 21: Débit journalier simulé -pour un calage sur le débit- en fonction du débit mesuré, une année donnée de la période de calage, du 1 <sup>er</sup> octobre 1956 au 1 <sup>er</sup> octobre 1957 (Fernow 7/4) .....	41
Figure 22: Débit journalier simulé -pour un calage sur la racine carrée du débit- en fonction du débit mesuré, une année donnée de la période de calage, du 1 <sup>er</sup> octobre 1956 au 1 <sup>er</sup> octobre 1957 (Fernow 7/4) .....	41
Figure 23: Débit journalier simulé -pour un calage sur le logarithme du débit- en fonction du débit mesuré, une année donnée de la période de calage, du 1 <sup>er</sup> octobre 1956 au 1 <sup>er</sup> octobre 1957 (Fernow 7/4) .....	41

**Tableau 1 : Présentation des caractéristiques des 18 paires de bassins versants.....** 9

Tableau 2 : Augmentation maximale du débit interannuel reconstitué et des quantiles 0.2, 0.5 et 0.8 des débits journaliers consécutive à une coupe à blanc, en % (indice 100) .....	21
Tableau 3 : Augmentation du débit moyen reconstitué et des quantiles 0.2, 0.5 et 0.8 consécutive à une coupe à blanc, respectivement en mm/an et en mm/jour .....	21
Tableau 4 : Diminution du débit moyen reconstitué et des quantiles 0.2, 0.5 et 0.8 consécutive aux plantations, en % (indice 100).....	28
Tableau 5 : Détails sur les modèles débit-débit n°1 à 15.....	42
Tableau 6 : Détails sur les modèles débit-débit n°6 à 22.....	43
Tableau 7 : Détails sur les modèles débit-débit n°23 à 34.....	44
Tableau 8 : Valeur du C2M (pour calage et contrôle sur la racine carrée du débit) lorsque l'on divise la période avant-traitement en deux demi-périodes, l'une de calage l'autre de contrôle. Le premier C2M, noté C2M 1, correspond à un calage sur la première demi-période et un contrôle sur la deuxième; le deuxième, noté C2M 2, correspond à un calage sur la deuxième demi-période et un contrôle sur la première. La colonne qui suit est la moyenne des 2 C2M précédents. ....	45

Tableau 9 : Augmentation relative maximale du débit observée suite à la coupe (en pourcentage par rapport au débit avant coupe)..... 46

## TABLE DES ANNEXES

**Annexe 1** : Formule de Penman-Monteith

**Annexe 2** : Réflexions sur le choix du calage (et du contrôle): sur le débit  $Q$ , la racine carrée de  $Q$  ou sur  $\log Q$

**Annexe 3** : Choix d'un modèle reliant le débit journalier de 2 bassins versants proches

**Annexe 4** : Valeurs du coefficient de performance C2M lors du calage-contrôle préliminaire pour chacune des 18 paires de bassins versants étudiées (calage et contrôle sur  $\sqrt{Q}$ )

**Annexe 5** : Comparaison des résultats obtenus lors du stage concernant l'effet à court terme de la coupe sur le débit moyen à ceux de la littérature

## Annexe 1 : Formule de Penman-Monteith

L'évapotranspiration de Penman-Monteith est « l'évaporation d'une pelouse rase suffisamment étendue, en bon état et convenablement alimentée en eau », c'est-à-dire lorsque l'eau n'est pas facteur limitant. Il faudrait plutôt lui donner le nom d'évapotranspiration de référence car elle correspond, selon Penman, à la valeur maximale de l'évapotranspiration potentielle pour un végétal particulier, en l'occurrence de la fétuque (gazon). En réalité, l'évapotranspiration de Penman pourrait être dépassée d'un facteur pouvant aller jusqu'à 1,4.

La formule fournissant l'expression de l'évapotranspiration potentielle de Penman-Monteith s'exprime comme suit :

$$E_0 = \frac{\Delta R_n + \frac{\rho_a C_p}{r_a} (e_a - e_d)}{\lambda \rho_w (\Delta + \gamma)}$$

où  $\Delta$ , exprimée en  $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  désigne la pente de la courbe de pression de vapeur saturante en fonction de la température à la température  $T_a$  :

$$\Delta = \frac{4098 e_a}{(237.3 + T_a)^2}$$

$e_a$  = Pression de vapeur saturante à la température de l'air, en kPa

$e_d$  = Pression de vapeur effective de l'air, en kPa

$T_a$  = Température moyenne de l'air, en  $^\circ\text{C}$

$C_p$  = capacité thermique massique de l'air à pression constante, en  $\text{MJ kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

$\rho_a$  = masse volumique de l'air, en  $\text{kg m}^{-3}$

Si, en outre, la résistance stomatique est prise en compte, alors il ne s'agit plus de l'évapotranspiration potentielle mais de l'évapotranspiration réelle :

$$ETR = \frac{\Delta R_n + \frac{\rho_a C_p}{r_a} (e_a - e_d)}{\lambda \rho_w \left[ \Delta + \gamma \left( 1 + \frac{r_s}{r_a} \right) \right]}$$

$r_a$  = résistance aérodynamique, en  $\text{jour m}^{-1}$

$r_s$  = résistance de surface (stomatale), en  $\text{jour m}^{-1}$

Cette formule présenterait l'avantage de prendre en considération les mécanismes stomataux (fermeture des stomates lors de la sécheresse) : il faudrait alors l'appliquer à un pas de temps fin (l'heure au minimum), avec des données climatiques au même pas de temps, et avoir recours à un modèle dynamique d'évolution de la résistance stomatique.

Annexe 2 : Réflexions sur le choix du calage (et du contrôle): sur le débit Q, la racine carrée de Q ou sur logQ

Lors des différents tests s'appuyant sur le principe du calage-contrôle, une question s'est posée à nous : faut-il caler et contrôler les paramètres sur le débit, ou sur sa racine carrée ou encore sur son logarithme népérien ?

Rappelons que le calage des paramètres a consisté à choisir ces derniers de telle sorte qu'ils minimisent  $\sum_i (Q_{A \text{ simulé}}(i) - Q_A(i))^2$ , c'est-à-dire qu'ils maximisent le C2M, grandeur comprise entre -1 et 1 et qui est d'autant plus proche de 1 que l'écart entre les valeurs simulées et les valeurs réelles est faible:

$$C2M = \frac{1 - \frac{S1}{S2}}{1 + \frac{S1}{S2}}$$

$$\text{avec } S1 = \sum_i (Q_A(i) - Q_{A \text{ simulé}}(i))^2 \text{ et } S2 = \sum_i (Q_A(i) - Q_{A \text{ moyen}}(i))^2$$

$Q_A(i)$  désignant le débit réel du jour i, en mm/jour (en pratique, nous utilisons le débit mesuré en guise du débit réel qui demeure inconnu)

$Q_{A \text{ simulé}}(i)$  = débit simulé du jour i, en mm/jour,

$Q_{A \text{ moyen}}(i)$  = débit journalier moyen, en mm/jour (moyenne des débits journaliers de la période de calage)

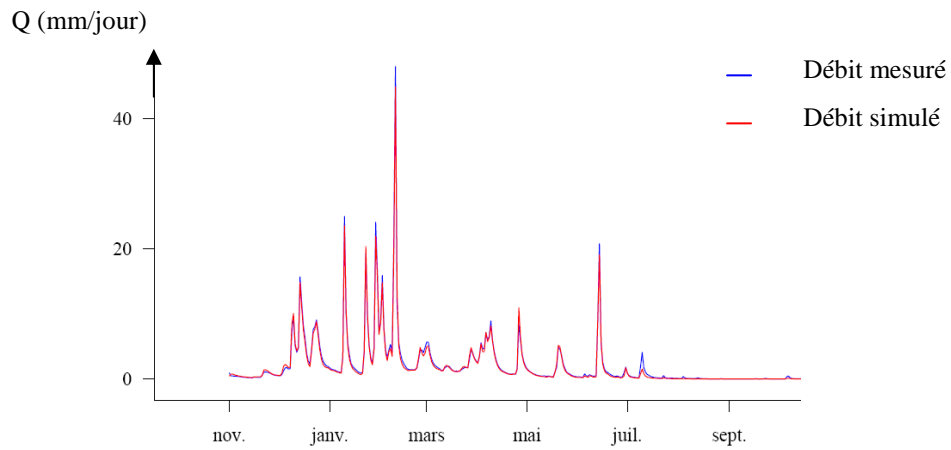
les sommes portant sur l'ensemble des jours appartenant à la période de calage

Si au lieu de caler les paramètres du modèle sur le débit, on les cale sur la racine carrée des débits, on ne minimise plus la somme des carrés des erreurs commises sur les débits mais la somme des carrés des erreurs commises sur la racine carrée des débits : autrement dit, on minimise  $\sum_i (\sqrt{Q_{A \text{ simulé}}(i)} - \sqrt{Q_A(i)})^2$ .

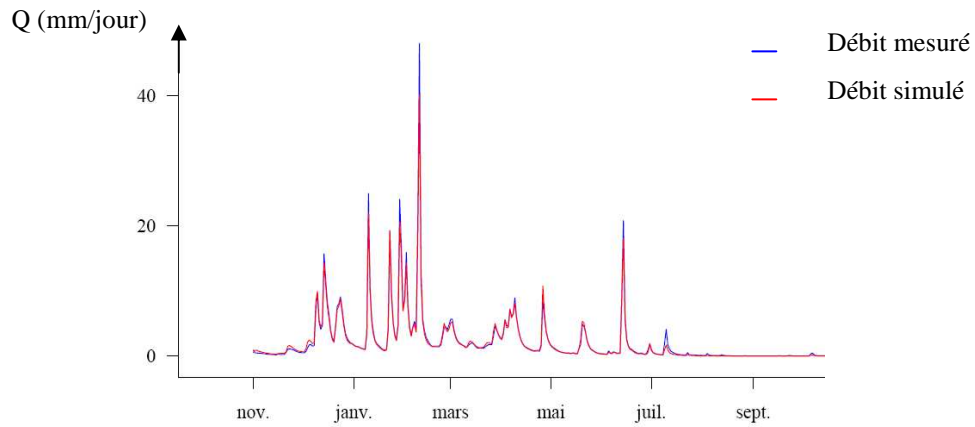
De même, le calage sur le logarithme népérien de Q revient à minimiser  $\sum_i (\ln Q_{A \text{ simulé}}(i) - \ln Q_A(i))^2$ .

Dans le premier cas, on donne beaucoup de "poids" aux forts débits : pour un calage sur Q, les forts débits s'ajustent bien mais les débits faibles sont moins bien simulés. Au contraire, le calage sur le logarithme népérien des débits privilégie le bon ajustement des débits faibles, au détriment des forts débits qui, quant à eux risquent d'être mal simulés. Le calage sur la racine carrée des débits constitue une solution intermédiaire qui permet de simuler correctement les débits lorsqu'ils ne sont ni trop forts ni trop faibles.

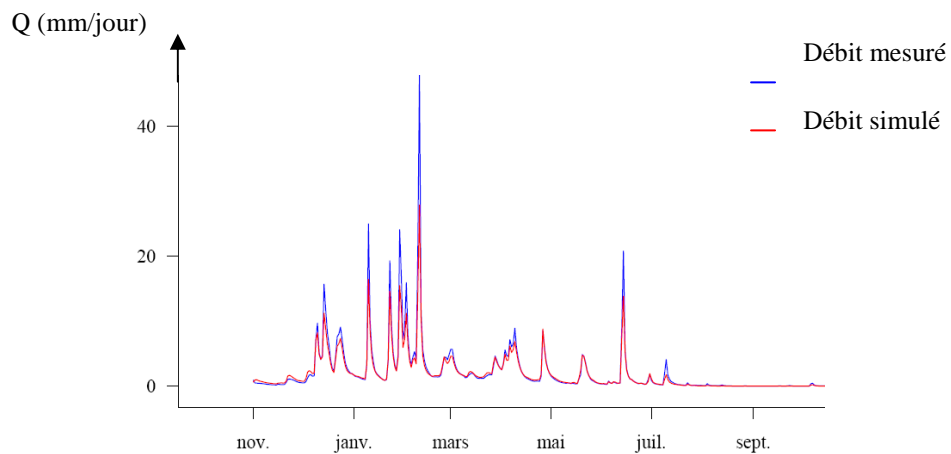
Cela se voit de manière relativement nette sur le cas de la forêt expérimentale de Fernow: nous donnons ci-dessous la courbe du débit simulé (pour un calage respectivement sur Q,  $\sqrt{Q}$  et lnQ) et celle du débit mesuré pendant une année quelconque du calage.



**Figure 18 : Débit journalier simulé pour un calage sur le débit (courbe rouge) et mesuré (courbe bleue) une année donnée de la période de calage, du 1<sup>er</sup> octobre 1956 au 1<sup>er</sup> octobre 1957 (Fernow 7/4)**

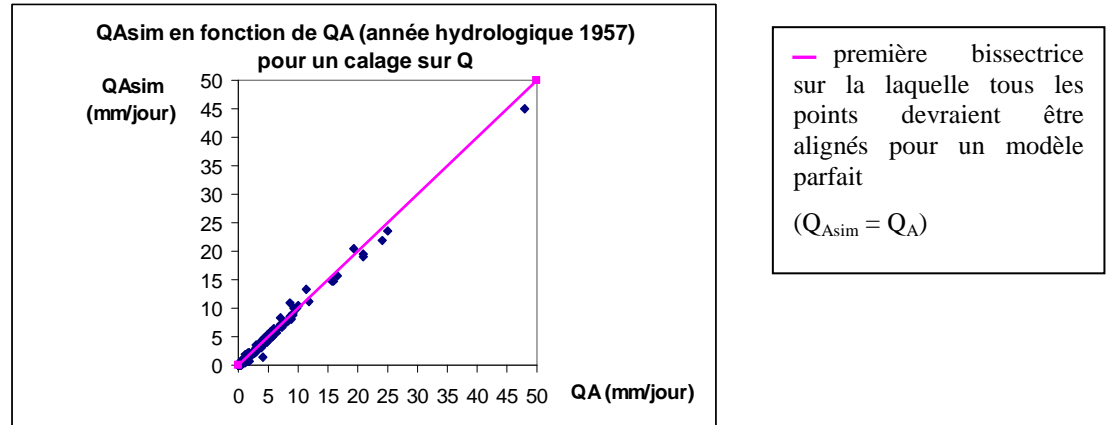


**Figure 19: Débit journalier simulé pour un calage sur la racine carrée du débit (courbe rouge) et mesuré (courbe bleue) du 1<sup>er</sup> octobre 1956 au 1<sup>er</sup> octobre 1957 (Fernow 7/4)**

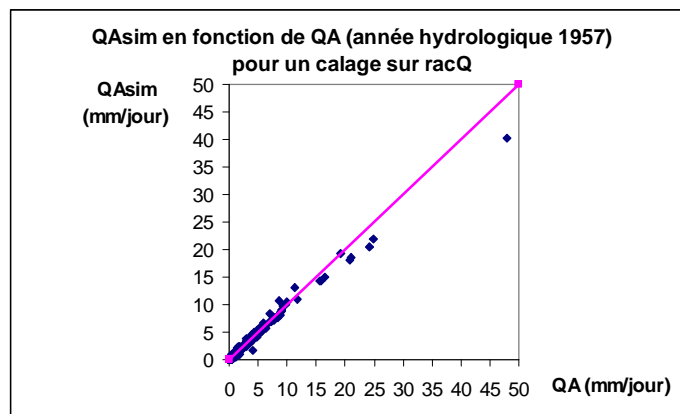


**Figure 20: Débit journalier simulé pour un calage sur le logarithme népérien du débit (courbe rouge) et mesuré (courbe bleue) du 1<sup>er</sup> octobre 1956 au 1<sup>er</sup> octobre 1957 (Fernow 7/4)**

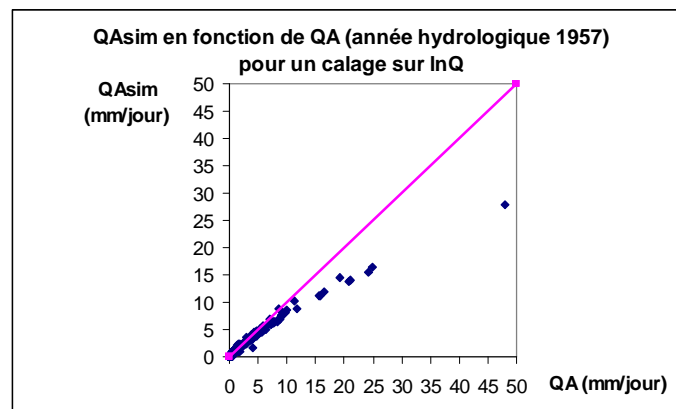
Le fait que le calage sur le débit  $Q$  accorde un poids plus important aux forts débits (et, à l'inverse, le calage sur le logarithme du débit donne plus de poids aux faibles débits) peut également se voir sur les graphiques suivants où nous avons tracé le débit simulé (reconstitué) en fonction du débit mesuré lorsque l'on a calé respectivement sur le débit  $Q$ , sur sa racine carrée ou son logarithme:



**Figure 21: Débit journalier simulé -pour un calage sur le débit- en fonction du débit mesuré, une année donnée de la période de calage, du 1<sup>er</sup> octobre 1956 au 1<sup>er</sup> octobre 1957 (Fernow 7/4)**



**Figure 22: Débit journalier simulé -pour un calage sur la racine carrée du débit- en fonction du débit mesuré, une année donnée de la période de calage, du 1<sup>er</sup> octobre 1956 au 1<sup>er</sup> octobre 1957 (Fernow 7/4)**



**Figure 23: Débit journalier simulé -pour un calage sur le logarithme du débit- en fonction du débit mesuré, une année donnée de la période de calage, du 1<sup>er</sup> octobre 1956 au 1<sup>er</sup> octobre 1957 (Fernow 7/4)**

Annexe 3: Choix d'un modèle reliant le débit journalier de 2 bassins versants proches

NB :  $\alpha = \frac{\sum_i Q_A(i)}{\sum_i Q_B(i)}$  est un coefficient et non un paramètre (même s'il s'agit d'une quantité qui doit être calculée sur la période de calage exclusivement). Il s'agit du rapport des volumes d'eau écoulés sur la période de calage,  $Q_A(i)$  et  $Q_B(i)$  étant respectivement le débit journalier à l'exutoire des bassins versants A et B. On a préféré ne pas intégrer  $\alpha$  dans  $X_1$  afin de pouvoir vérifier très simplement que le paramètre  $X_1$  est proche de 1.

n°	Modèle	Détails sur les facteurs
1	$Q_A(i) = \alpha X_1 Q_B(i)$	$X_1 \approx 1$ et positif
2	$Q_A(i) = \alpha X_1 Q_B(i)^{X_2}$	$X_2 \approx 1$ et positif
3	$Q_A(i) = \alpha X_1 Q_B(i) + X_2$	$X_2 \approx 0$ et pouvant être négatif
4	$Q_A(i) = \alpha X_1 Q_B(i) + X_2 Q_B(i)^2$	$X_2 \approx 0$ et pouvant être négatif
5	$Q_A(i) = \alpha X_1 Q_B(i) + X_2 Q_B(i)^3$	$X_2 \approx 0$ et pouvant être négatif
6	$Q_A = \alpha X_1 Q_B(i) + X_2 \sqrt{Q_B(i)}$	$X_2 \approx 0$ et pouvant être négatif
7	$Q_A(i) = \alpha X_1 th(X_2 Q_B(i))$	$X_2 \approx 1$ et positif
8	$Q_A(i) = \alpha X_1 Q_B(i) + X_2 Q_B(i)^2 + X_3$	$X_2 \approx 0$ et pouvant être négatif $X_3 \approx 0$ et pouvant être négatif
9	$Q_A(i) = \alpha X_1 Q_B(i) + X_2 Q_B(i)^3 + X_3$	$X_2 \approx 0$ et pouvant être négatif $X_3 \approx 0$ et pouvant être négatif
10	$Q_A(i) = \alpha X_1 Q_B(i) + X_2 Q_B(i)^{X_3}$	$X_2 \approx 0$ et pouvant être négatif
11	$Q_A(i) = \alpha X_1 Q_B(i)^{X_2} + X_3$	$X_2 \approx 1$ et positif $X_3 \approx 0$ et pouvant être négatif
12	$Q_A(i) = \alpha X_1 (e^{X_2 Q_B(i)} - 1)$	$X_2 \approx 1$ et positif
13	$Q_A(i) = \alpha X_1 \ln(X_2 Q_B(i) + 1)$	$X_2 \approx 1$ et positif
14	$Q_A(i) = \alpha X_1 th(X_2 Q_B(i)) + X_3$	$X_2 \approx 1$ et positif $X_3 \approx 0$ et pouvant être négatif
15	$Q_A(i) = \alpha X_1 Q_B(i - X_3)^{X_2}$	$X_2 \approx 1$ et positif $X_3$ (qui correspond à un décalage temporel) $\approx 0$ et pouvant être négatif

**Tableau 5 : Détails sur les modèles débit-débit n°1 à 15**



n°	Modèle	Détails sur les facteurs et paramètres
16	$Q_A(i) = \alpha X_1 Q_B(i - X_3)^{X_2} Q_B(i - X_3 + 1)^{X_4}$	$X_2 \approx 1$ et positif $X_3$ (qui correspond à un décalage temporel) $\approx 0$ et pouvant être négatif $X_4 \approx 1$ et positif
17	$Q_A(i) = \alpha X_1 Q_B(i)^{X_2} e^{X_3 \sin\left[\frac{2\pi(d+X_4)}{365}\right]}$	$X_2 \approx 1$ et positif $X_3 \approx 0$ et positif $X_4 \in [0; 364]$
18	$Q_A(i) = \alpha X_1 Q_B(i)^{X_2} e^{X_3 \sin\left[\frac{2\pi(d+X_4)}{365}\right] + X_5 \cos\left[\frac{2\pi(d+X_4)}{365}\right]}$	$X_2 \approx 1$ et positif $X_3 \approx 0$ et positif $X_4 \in [0; 364]$ $X_5 \approx 0$ et positif
19	$Q_A(i) = \alpha X_1 Q_B(i - X_3)^{X_2} e^{X_4 \sin\left[\frac{2\pi(d+X_5)}{365}\right] + X_6 \cos\left[\frac{2\pi(d+X_5)}{365}\right]}$	$X_2 \approx 1$ et positif $X_3$ (décalage temporel) $\approx 0$ et pouvant être négatif $X_4 \approx 0$ et positif $X_5 \in [0; 364]$ $X_6 \approx 0$ et positif
20	$Q_A(i) = \alpha \gamma_1 Q_B(i)^{X_2}$	$\gamma_1 = \frac{\sum_i Q_A(i) Q_B(i)^{X_2}}{\alpha \sum_i Q_B(i)^{2X_2}}$ fixé $X_2 \approx 1$ et positif
21	$Q_A(i) = \alpha \gamma_1 Q_B(i - X_3)^{X_2}$	$\gamma_1 = (1/\alpha) \left( \frac{\sum_i Q_A(i) Q_B(i)^{X_2}}{\sum_i Q_B(i)^{2X_2}} \right)$ fixé $X_2 \approx 1$ et positif
22	$Q_A(i) = \alpha \gamma_{rac} Q_B(i - X_3)^{X_2}$	$\gamma_{rac} = (1/\alpha) \left( \frac{\sum_i \sqrt{Q_A(i)} \sqrt{Q_B(i - X_3)^{X_2}}}{\sum_i Q_B(i)^{X_2}} \right)^2$ $X_2 \approx 1$ et positif $X_3$ (qui correspond à un décalage temporel) $\approx 0$ et pouvant être négatif

Tableau 6 : Détails sur les modèles débit-débit n°16 à 22

n°	Modèle	Détails sur les facteurs et paramètres
22	$Q_A(i) = \alpha \gamma_{1rac} Q_B(i - X_3)^{X_2}$	$\gamma_{1rac} = (1/\alpha) \left( \frac{\sum_i \sqrt{Q_A(i)} \sqrt{Q_B(i - X_3)^{X_2}}}{\sum_i Q_B(i)^{X_2}} \right)^2$ fixé $X_2 \approx 1$ et positif $X_3$ (décalage temporel) $\approx 0$ et pouvant être négatif
23	Modèle 23 = max <sub>calage</sub> (modèle 12, modèle 13) (*)	
24	Modèle 24 = max <sub>calage</sub> (modèle 4, modèle 6)	
25	$Q_A(i) = \alpha X_1 (-1 + \sqrt{1 + X_2 Q_B(i)})$	$X_2 \approx 2$ et positif
26	$Q_A(i) = \alpha X_1 (-1 + \sqrt{1 + X_2 Q_B(i) + X_3})$	$X_2 \approx 2$ et positif $X_3 \approx 0$ et pouvant être négatif
27	$Q_A(i) = \alpha X_1 Q_B(i - X_3) + X_2 Q_B(i - X_3)^2$	$X_2 \approx 0$ et pouvant être négatif $X_3 \approx 0$ et pouvant être négatif
28	$Q_A(i) = \alpha X_1 Q_B(i - X_3) + X_2 Q_B(i - X_3)^2 + X_4$	$X_2 \approx 0$ et pouvant être négatif $X_3 \approx 0$ et pouvant être négatif $X_4 \approx 0$ et pouvant être négatif
29	$Q_A(i) = \alpha X_1 (-1 + \sqrt{1 + X_2 Q_B(i - X_3)})$	$X_2 \approx 2$ et positif $X_3 \approx 0$ et pouvant être négatif
30	$Q_A(i) = \alpha X_1 (-1 + \sqrt{1 + X_2 Q_B(i - X_3) + X_4})$	$X_2 \approx 2$ et positif $X_3 \approx 0$ et pouvant être négatif $X_4 \approx 0$ et pouvant être négatif
31	Modèle 31 = max <sub>calage</sub> (modèle 4, modèle 25)	
32	Modèle 32 = max <sub>calage</sub> (modèle 8, modèle 26)	
33	Modèle 33 = max <sub>calage</sub> (modèle 27, modèle 29)	
34	Modèle 34 = max <sub>calage</sub> (modèle 28, modèle 30)	

**Tableau 7 : Détails sur les modèles débit-débit n°23 à 34**

(\*) Explication de la construction du modèle 23:

Lorsque l'on écrit que "Modèle 23 = max<sub>calage</sub> (modèle 12, modèle 13)", cela signifie que l'on considère les modèles 12 et 13 et que l'on choisit celui qui a été le meilleur au calage pour l'appliquer au contrôle. Cela vient du fait que les formules 12 et 13 sont réciproques l'une de l'autre. En effet, si le débit d'un bassin versant est l'exponentielle du débit de l'autre bassin versant, le deuxième est un logarithme népérien du premier. D'après le principe de réciprocité des formules (des modèles), pour chaque paire de bassins, il n'y a qu'une formule sur les deux qui convient, d'où la nécessité de prendre, à chaque fois, le meilleur (au calage) des deux modèles.

Annexe 4 : Valeurs du coefficient de performance C2M lors du calage-contrôle préliminaire pour chacune des 18 paires de bassins versants étudiées (calage et contrôle sur  $\sqrt{Q}$ )

Paire de bassins versants	n°	C2M 1	C2M 2	(C2M 1 + C2M 2)/2	Fiabilité selon les C2M
Andrews	1	0,94	0,94	0,94	bonne
Coshocton	2	0,76	0,83	0,80	assez bonne
Fernow 1/4	3	0,98	0,97	0,97	bonne
Hubbard Brook 2/3	4	0,96	0,97	0,96	bonne
Hubbard Brook 5/3	5	0,97	0,96	0,97	bonne
Mokobulaan A/C	6	0,64	0,85	0,75	moyenne (caractère irrégulier)
Mokobulaan B/C	7	0,43	0,79	0,61	mauvaise
Real Collobrier Rimbaud/Valescure	8	0,78	0,79	0,79	bonne
Real Collobrier Rimbaud/Vaubarnier	9	0,59	0,71	0,65	mauvaise
Three Bar B/D	10	0,74	0,55	0,65	mauvaise
Three Bar C/D	11	0,60	0,85	0,73	assez mauvaise
Fernow 2/4	12	0,96	0,97	0,96	bonne
Fernow 3/4	13	0,99	0,98	0,98	bonne
Fernow 5/4	14	0,97	0,96	0,97	bonne
Fernow 6/4	15	0,91	0,95	0,93	bonne
Fernow 7/4	16	0,96	0,97	0,97	bonne
Maroondah Picaninny Creek/Slip Creek	17	0,87	0,70	0,78	moyenne (caractère irrégulier)
Maroondah Myrtle 2/Myrtle 1	18	0,96	0,97	0,97	bonne

**Tableau 8 : Valeur du C2M (pour calage et contrôle sur la racine carrée du débit) lorsque l'on divise la période avant-traitement en deux demi-périodes, l'une de calage l'autre de contrôle. Le premier C2M, noté C2M 1, correspond à un calage sur la première demi-période et un contrôle sur la deuxième; le deuxième, noté C2M 2, correspond à un calage sur la deuxième demi-période et un contrôle sur la première. La colonne qui suit est la moyenne des 2 C2M précédents.**

Remarque: par "caractère irrégulier", on entend la forte dépendance du C2M vis-à-vis des périodes de calage et de contrôle (lorsque C2M 1 et C2M 2 sont très différents).

Annexe 5: Comparaison des résultats obtenus lors du stage concernant l'effet à court terme de la coupe sur le débit moyen à ceux de la littérature

	( $\Delta Q_{moy}$ )max, en %	( $\Delta Q_{moy}$ )max, en % d'après la littérature (différentes approches sont utilisées)
Andrews	50%	34%
Fernow 1/4	20%	22%
Fernow 3/4	20%	1%
Fernow 6/4	30%	33%
Fernow 7/4	20%	20%
Hubbard Brook 2/3	20%	41%
Hubbard Brook 5/3	10%	23%
Maroondah (Picaninny Creek)	100%	90%
Maroondah (Myrtle 2/Myrtle 1)	40%	38%

**Tableau 9 : Augmentation relative maximale du débit observée suite à la coupe (en pourcentage par rapport au débit avant coupe)**

## **BIBLIOGRAPHIE**

### **- Andrews**

- Hicks, B.J., Beschta, R.L. and Harr, R.D., 1991. Long-Term Changes in Streamflow Following Logging in Western Oregon and Associated Fisheries Implications. *Water Resources Bulletin*, 27(2): 217-226.
- Jones, J.A. and Grant, G.E., 1996. Peak flow responses to clear-cutting and roads in small and large basins, western Cascades, Oregon. *Water Resources Research*, 32(4): 959-974.
- Moore, G.W., Bond, B.J., Jones, J.A., Phillips, N. and Meinzer, F.C., 2004. Structural and compositional controls on transpiration in 40-and 450-year-old riparian forests in western Oregon, USA. *Tree Physiology*, 24(5): 481-491.
- Thomas, R.B. and Megahan, W.F., 1998. Peak flow responses to clear-cutting and roads in small and large basins, western Cascades, Oregon: A second opinion. *Water Resources Research*, 34(12): 3393-3403.
- Waichler, S.R., Wemple, B.C. and Wigmosta, M.S., 2005. Simulation of water balance and forest treatment effects at the H.J. Andrews Experimental Forest. *Hydrological Processes*, 19(16): 3177-3199.

### **- Coshocton**

- Langford, K.J. and McGuinness, J.L., 1976. A comparison of modeling and statistical evaluation of hydrologic change. *Water Resources Research*, 12(6): 1322-1324.
- McGuinness, J.L. and Harrold, L., 1971. Reforestation influences on small watershed streamflow. *Water Resources Research*, 7(4): 845-852.
- McGuinness, J.L. and Harrold, L.L., 1961. Hydrogeologic nature of streamflow on small watersheds. *Journal of the hydraulics division*.

### **- Fernow**

- Kochenderfer, J.N., Adams, M.B., Miller, G.W. and Helvey, J.D., 2007. Factors affecting large peakflows on appalachian watersheds: lessons from the fernow experimental forest, pp. 25.
- Reinhart, K.G., A.R., E. and Trimble, G.R., 1963. Effect on streamflow of four forest practices in the mountains of West Virginia. U.S. Forest Service, pp. 79.
- Tajchman, S.J., Fu, H. and Kochenderfer, J.N., 1997. Water and energy balance of a forested Appalachian watershed. *Agricultural and Forest Meteorology*, 84: 61-68.

- **Hubbard Brook**

- Bailey, A.S., Hornbeck, J.W., Campbell, J.L. and Eagar, C., 2002. Hydrometeorological database for Hubbard Brook Experimental Forest: 1955 - 2000. USDA.
- Hornbeck, J.W., 1973. The problem of extreme events in paired-watershed studies. USDA.
- Hornbeck, J.W., Federer, C.A. and Pierce, R.S., 1987. Effects of whole-tree clearcutting on streamflow can be adequately estimated by simulation.
- Hornbeck, J.W., Martin, C.W. and Eagar, C., 1997. Summary of water yield experiments at Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire. Canadian Journal of Forest Research, 27: 2043-2052.

- **Maroondah**

- O'Shaughnessy, P.J., Langford, K.J., Duncan, H.P. and Moran, R.J., 1979. Catchment experiments in mountain ash forests at North Maroondah. Australian Forestry, 42(3): 150-160.
- Watson, F., Vertessy, R.A., McMahon, T.A., Rhodes, B. and Watson, I., 2001. Improved methods to assess water yield changes from paired-catchment studies: application to the Maroondah catchments. Forest Ecology and Management, 143: 189-204.
- Watson, F.G.R., Vertessy, R.A., McMahon, T.A., Rhodes, B.G. and Watson, I.S., 1999. The hydrologic impacts of forestry on the maroondah catchments. Cooperative research centre for catchments hydrology  
Melbourne Water pp. 80.

- **Mokobulaan**

- Schulze, R.E. and George, W.J., 1987. Simulation of effects of forest growth on water yield with a dynamic process-based user model. Department of agricultural engineering, University of Natal, Pietermaritzburg, South Africa.
- Scott, D.F. and 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.
- Scott, D.F. and Prinsloo, F.W., 2008. Longer-term effects of pine and eucalypt plantations on streamflow. Water Resources Research, 44.
- Van Lill, W.S., Kruger, F.J. and Wyk, D.B.v., 1980. The effect of afforestation with *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden and *Pinus patula* Schlecht. et Cham. on streamflow from experimental catchments at Mokobulaan, Transvaal. Journal of Hydrology, 48: 107-118.

- **Réal Collobrier**

- Cosandey, C. et al., 2005. The hydrological impact of the Mediterranean forest: a review of French research. *Journal of Hydrology*, 301(1-4): 235-249.
- Folton, N. and Lavabre, J., 1995. Bassin versant de recherche du Real Collobrier: Informations générales sur la pluviométrie et les écoulements. CEMAGREF, pp. 16.

- **Three Bar**

- Davis, E.A., 1984. Conversion of Arizona Chaparral to Grass Increases Water Yield and Nitrate Loss. *Water Resources Research*, 20(11): 1643-1649.
- Davis, E.A., 1987a. Chaparral Conversion and Streamflow - Nitrate Increase Is Balanced Mainly by a Decrease in Bicarbonate. *Water Resources Research*, 23(1): 215-222.
- Davis, E.A., 1987b. Chaparral Conversion to Increase Streamflow in Arizona - Sequential Treatments Extend Duration of Nitrate Loss to Stream Water. *Forest Science*, 33(1): 89-103.
- Hibbert, A.R., 1967. Forest treatment effects on water yield. In: W.E. Sopper and H.W. Lull (Editors), *Forest Hydrology: Proceedings of a National Science Foundation Advanced Science Seminar*. Pergamon Press, Oxford, pp. 527-543.
- Hibbert, A.R., 1971. Increases in streamflow after converting chaparral to grass. *Water Resources Research*, 7(1): 71-80.
- Hibbert, A.R., 1985. Storm runoff and sediment production after wildfire in chaparral. *Hydrology and Water Resources in Arizona and the Southwest*, 15: 31-42.
- Hibbert, A.R., Davis, E.A. and Brown, T.C., 1975. Managing chaparral for water and other resources in Arizona, *Watershed Management Symposium*. ASCE, Logan, Utah, pp. 445-468.
- Hibbert, A.R., Davis, E.A. and Knipe, O.D., 1981. Water yield changes resulting from treatment of arizona chaparral. *USDA Forest Service*, pp. 382-389.
- Hibbert, A.R., Davis, E.A. and 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*.

- **Autres références**

- Andréassian, V., 2002. Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants. Ph.D. Thesis, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 781 pp.
- Andréassian, V., 2004a. Couvert forestier et comportement hydrologique des bassins versants. *La Houille Blanche*(2): 31-35.
- Andréassian, V., 2004b. Waters and Forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, 291(1-2): 1-27.

- Bary-Lenger, A., 1968. La forêt. Perron, 620 pp.
- Best, A., Zhang, L., McMahon, T., Western, A. and Vertessy, R., A critical review of paired catchment studies with reference to seasonal flows and climatic variability. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, pp. 1-31.
- Biro, P., 1965. Les formations végétales du globe. Sedes, Paris, 508 pp.
- Cosandey, C., 1984. Recherches sur les bilans de l'eau dans l'ouest du Massif Armoricain. PhD Thesis, Université Paris IV, Paris, 515 pp.
- Cosandey, C., 1995. La forêt réduit-elle l'écoulement annuel ? Annales de Géographie(581-582): 7-25.
- Cosandey, C., 2003. Les eaux courantes. Belin, 240 pp.
- Hewlett, J.D., 1982. Principles of Forest Hydrology. The University of Georgia Press, Athens, 183 pp.
- Humbert, J. and Najjar, G., 1992. Influence de la forêt sur le cycle de l'eau en domaine tempéré, une analyse de la littérature francophone. Université Louis Pasteur, CEREG-URA 95 du CNRS, Strasbourg.
- Johnson, R., 1998. The forest cycle and low river flows: a review of UK and international studies. Forest Ecology and Management, 109: 1-7.
- Jones, J.A. and Post, D.A., 2004. Seasonal and successional streamflow response to forest cutting and regrowth in the northwest and eastern United States. Water Resources Research, 40(5).
- Lavabre, J. and Andréassian, V., 2000. Eaux et forêts : la forêt, un outil de gestion des eaux? Cemagref éditions, Antony, 116 pp.
- Oudin, L., 2004. Recherche d'un modèle d'évaporation potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global. PhD Thesis, ENGREF, Paris, 290 pp.
- Oudin, L., Andréassian, V., Lerat, J. and Michel, C., 2008. Has land cover a significant impact on mean annual streamflow? An international assessment using 1508 catchments. Journal of Hydrology(357): 303-316.
- Pinto, P., 2006. Ecologie et croissance des Abies Alba Mill. en peuplements purs et mélangés dans le Massif Vosgien (Nord-Est de la France), AgroParisTech-ENGREF, 145 pp.
- Stednick, J.D., 1996. Monitoring the effects of timber harvest on annual water yield. Journal of Hydrology, 176: 79-95.
- Wilm, H.G., The influence of forest vegetation on water and soil. FAO, Forestry Department.



## RESUME

Ce rapport traite de l'influence de la forêt, et en particulier des traitements forestiers (coupe à blanc, coupe partielle, plantations) sur le débit des rivières. Nous utilisons la méthode des bassins versants appariés pour comprendre l'influence de divers types de traitements forestiers sur le débit. La méthode des bassins versants appariés consiste à considérer deux bassins versants très similaires proches l'un de l'autre et d'appliquer un traitement à l'un tout en laissant l'autre intact.

Les chroniques de débits journaliers ont été divisées en deux périodes :

- la période de calage (appelée également période de calibration) pendant laquelle on identifie une relation statistique entre les débits journaliers des deux bassins versants
- la période de « contrôle » ou plus exactement de reconstitution (après le traitement) durant laquelle la relation (obtenue pendant la première période) est appliquée afin de reconstituer le débit qu'on aurait observé s'il n'y avait pas eu de traitement

Le débit mesuré peut alors être comparé au débit simulé (reconstitué).

Une variante de cette méthode (impliquant un calage séquentiel glissant) est également utilisée.

Les résultats de l'étude basée sur l'analyse de longues chroniques de débits de 18 bassins versants expérimentaux permettent de conclure quant à l'impact de traitements forestiers sur le débit, notamment en termes de débit moyen, d'étiages et de crues:

1. L'impact d'une coupe à blanc sur le débit dépend des caractéristiques climatiques du bassin versant : l'augmentation la plus importante du débit est observée dans les régions où le déficit d'écoulement est le plus fort
2. La coupe à blanc d'une forêt peut accroître le débit annuel d'environ 20 ou 30 %
3. Inversement des plantations peuvent réduire le débit d'autant. Néanmoins, dans les régions marquées par un déficit hydrique très important, comme à Mokobulaan (Afrique du Sud), les plantations d'arbres peuvent provoquer l'assèchement complet des cours d'eau
4. Tous les quantiles (percentiles 0.2, 0.5, 0.8 et même apparemment 0.95) augmentent suite aux coupes (ou diminuent suite aux plantations), y compris les crues. Cependant, la méthode des bassins versants ne peut pas être utilisée pour détecter l'influence sur les très fortes crues.
5. En ce qui concerne l'effet à long terme de coupe à blanc sur le débit, nous avons obtenu que, après une période d'augmentation du débit suivant immédiatement la coupe à blanc, une diminution a été observée sur un certain nombre de sites, ce qui pourrait être expliqué par la régénération de la forêt s'enrichissant de jeunes arbres plus actifs que les vieux du point de vue de l'évapotranspiration ; Le minimum est obtenu quelques dizaines d'années (environ 30 ans) après la coupe. L'étude que nous avons menée permet de montrer que ce phénomène – décrit précédemment en Australie – n'est pas spécifique à cette région.

A la fin du rapport nous comparons nos résultats à ceux d'autres études effectuées sur les mêmes ou sur d'autres bassins versants forestiers. Sont évoqués les avantages et les limites des analyses basées sur la méthode des bassins versants appariés et des propositions concernant la prolongation des investigations.