

**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, Écologie

Parcours Hydrologie-Hydrogéologie

**Peut-on bénéficier de la connaissance de la pression
atmosphérique en modélisation pluie-débit ?**

Golnoosh ASSADIAN FEALY

Directeur de recherche :

Ludovic OUDIN



**CEMAGREF
Antony**

septembre 2005



Remerciements

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à toute l'équipe de l'Unité de Recherche Hydrosystèmes et bioprocédés du Cemagref Antony, et surtout aux membres de l'équipe d'hydrologie, pour leur sympathie qui m'a permis d'avoir un bon cadre de travail.

Je remercie particulièrement mon encadrant, Ludovic Oudin pour ses explications, sa disponibilité et sa gentillesse.

Mes remerciements vont également à Charles Perrin et Vazken Andreassian pour leurs conseils et leurs encouragements, ainsi que Jean-Louis Rosique pour son aide avec Arcview.

Je remercie Jean-luc pour son aide qui m'a permis d'améliorer la qualité de ce mémoire .

Et enfin un merci à Nicolas et Josep pour les bons moments passés ensemble dans le bureau 129 !

برای زیبا و تحمل ۲ سال تنهاییش...

به خانواده کوچکم در پاریس که بدون آنها ادامه دادن ممکن نبود...

و به دو یار کودکی و همدم روزهای دل تنگی ام : سهراب و همایون

SOMMAIRE

1 Introduction générale	3
2 Peut-on mettre en évidence des relations directes entre débit et pression atmosphérique ?	5
2.1 Introduction.....	5
2.2 Revue de la littérature sur l'influence de la pression atmosphérique sur les phénomènes hydrologiques	6
2.2.1 Lien entre pression atmosphérique et niveau des nappes.....	6
2.2.2 Lien entre pression atmosphérique et débits	8
2.3 Corrélations entre pression atmosphérique et débits des rivières	8
2.3.1 Base de données utilisée	9
2.3.2 Approche descriptive.....	14
2.4 Conclusion.....	19
3 Peut-on bénéficier de la connaissance de la pression atmosphérique en modélisation pluie-débit ?.....	21
3.1 Introduction.....	21
3.2 Modèle utilisé	21
3.2.1 Quelques généralités sur la modélisation pluie-débit.....	21
3.2.2 Structure du modèle GR4J.....	22
3.2.3 Evaluation des performances du modèle	24
3.3 Approche empirique.....	25
3.3.1 Méthodologie	25
3.3.2 Présentation des résultats.....	29
3.3.3 Synthèse.....	35
3.4 Approche conceptuelle	36
3.4.1 Méthodologie	36
3.4.2 Présentation des résultats.....	37
3.5 Conclusion.....	39
4 Conclusion générale.....	40
5 Références	42
6 Annexe 1 : Formulation du modèle GR4J	44
Annexe 2 : Approche empirique	48

Annexe 3: Approche conceptuelle avec le K2	50
7 Abstract	52

1

Introduction générale

Il est connu que le rôle de la pression atmosphérique sur les phénomènes météorologiques est très important. Ainsi, la mesure de cette grandeur et de ses variations est essentielle pour réaliser des prévisions météorologiques, utiles pour éviter des catastrophes dues à des phénomènes exceptionnels par exemple. Mais la pression atmosphérique peut influencer d'autres phénomènes naturels. Dans ce travail, on essaie de savoir si les variations de la pression atmosphérique peuvent jouer un rôle dans les variations des débits des rivières.

Il est reconnu que certains bassins fortement karstiques répondent très mal aux impulsions pluviométriques. L'eau qui sort des résurgences provient de cavités où elle se trouve au contact d'un air qui n'est pas toujours en équilibre avec la pression atmosphérique. Il est certain que si la pression gazeuse au-dessus des poches d'eau varie, cela doit entraîner des variations de débit des sources en aval. Cet air souterrain est en liaison plus ou moins directe avec l'atmosphère. En conséquence on peut se demander s'il n'était pas légitime de rechercher d'éventuels liens entre les variations de pression atmosphérique et les variations de débit de certaines sources karstiques.

L'ensemble des bassins versants forme un continuum. Des phénomènes qui *a priori* semblent intervenir dans des bassins fortement karstiques doivent probablement également intervenir, quoi qu'à un degré moindre pour l'ensemble des bassins versants. Il apparaît donc légitime de poser la question du lien possible entre pression atmosphérique et débit.

Si l'influence de la pression atmosphérique est mise en évidence, sa prise en compte explicite dans de la modélisation pluie-débit pourrait alors apporter des améliorations sur la simulation des débits par ces modèles. En effet, face à certaines mauvaises performances des modèles, on peut imaginer les améliorer en intégrant des données nouvelles.

On suggère de partir d'un modèle pluie-débit très simple et d'introduire dans l'architecture de ce modèle, divers schémas pour traduire une influence possible

des variations atmosphériques sur certains états du système ou sur certaines expressions décrivant la formation des écoulements. Ces différentes idées seront testées sur un grand nombre de bassins versants et leur validation éventuelle découlera de l'amélioration ou non de la performance moyenne du modèle complet. La démarche sera très factuelle, menée sans a priori, et ne doit pas nécessairement conduire au succès mais simplement à une évaluation du caractère plus ou moins prometteur de ce type d'investigation.

2

Peut-on mettre en évidence des relations directes entre débit et pression atmosphérique ?

2.1 Introduction

Dans cette partie, nous chercherons à déterminer le rôle de la pression atmosphérique dans la transformation de la pluie en débit. Nous procéderons en deux étapes :

1. Dans un premier temps, nous recenserons les études existantes ayant traité de la pression atmosphérique en hydrologie ;
2. Dans un deuxième temps, nous chercherons à mettre en évidence les relations possibles entre pression atmosphérique et débits à l'exutoire de bassins versants. Nous nous appuierons pour cela sur un échantillon de 262 bassins versants présentant des conditions hydro-climatiques variées.

Cette partie permettra d'avoir une idée des bénéfices que nous pourrons tirer par la suite en utilisant la pression atmosphérique au sein des modèles pluie-débit.

2.2 Revue de la littérature sur l'influence de la pression atmosphérique sur les phénomènes hydrologiques

Ce paragraphe a pour objectif de présenter au lecteur le contexte et les objectifs de l'étude. Nous présenterons dans un premier temps, les références bibliographiques pertinentes pourtant sur le rôle de la pression atmosphérique dans les processus hydrologiques

2.2.1 Lien entre pression atmosphérique et niveau des nappes

Plusieurs auteurs ont établi une corrélation entre le cycle diurne de la pression atmosphérique et l'oscillation journalière du niveau des nappes.

Thuinzaad (1954) a travaillé sur une nappe captive et a pu établir une première analyse mathématique du phénomène, avec une extension aux nappes libres. Une chute de pression de l'ordre de 20 mbar (20 mBar) occasionne une remontée de la nappe d'environ 8 cm (observation effectuée dans les polders de l'ouest des Pays-Bas), sans qu'un cycle diurne apparaisse, ces travaux ayant été effectués au pas de temps journalier.

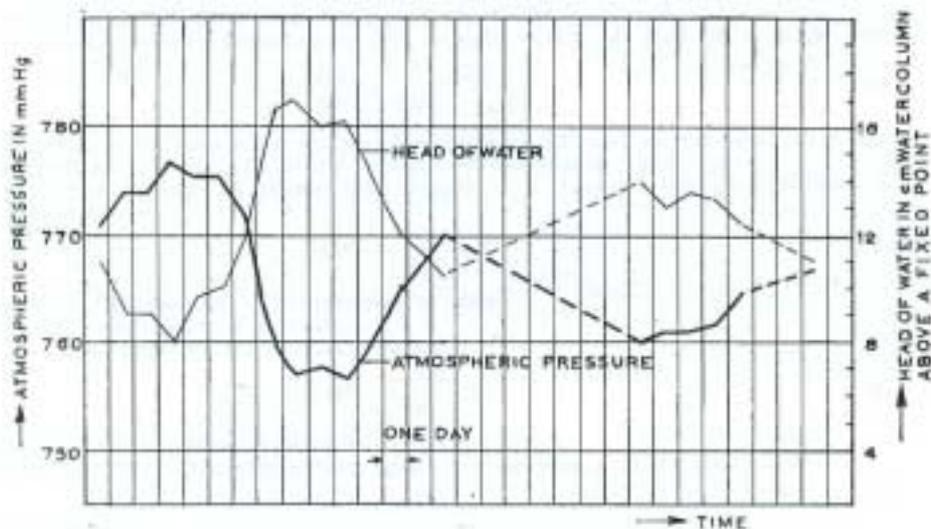


Figure 1 : comparaison de variation de pression atmosphérique et le niveau piézométrique (Argentine) . (D'après Raffo,...)

Castany (1963), suite aux travaux de Tison(1951), a également mis en évidence l'influence des variations de la pression atmosphérique sur le niveau des nappes captives.

Roche (1970) retenait cette hypothèse pour expliquer la variation de la nappe phréatique du lac Tchad contenue dans les argiles craquelées des bras asséchés des polders (ces variations n'existent pas lorsque la nappe est contenue dans les sables).

L'influence des variations de la pression atmosphérique est très sensible sur les niveaux piézométrique des nappes actives. Elle est observée dans les puits artésiens (Figure 2). Même les variations diurnes ont leur répercussion (Figure 3)

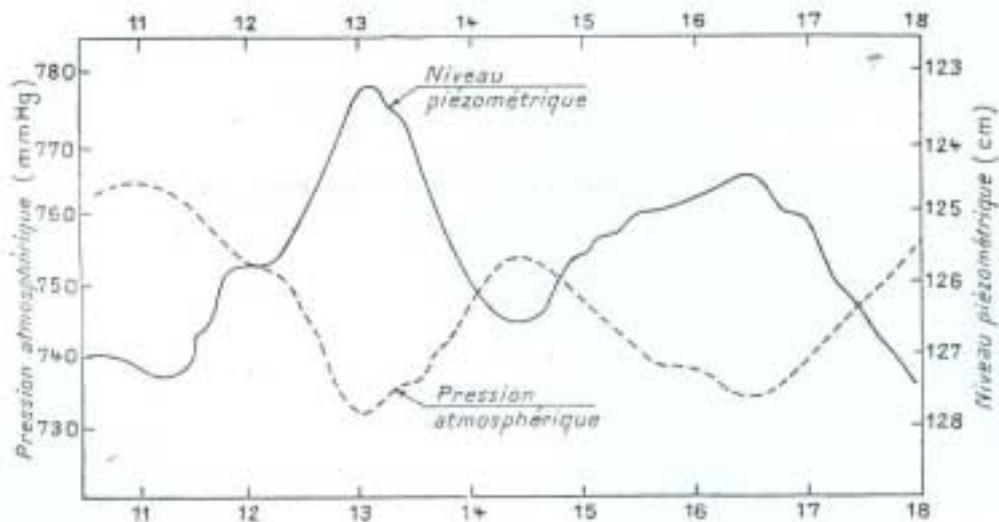


Figure 2: Étude expérimentale des relations entre la pression atmosphérique et le niveau piézométrique. (Argentine) . (D'après Raffo,...) .

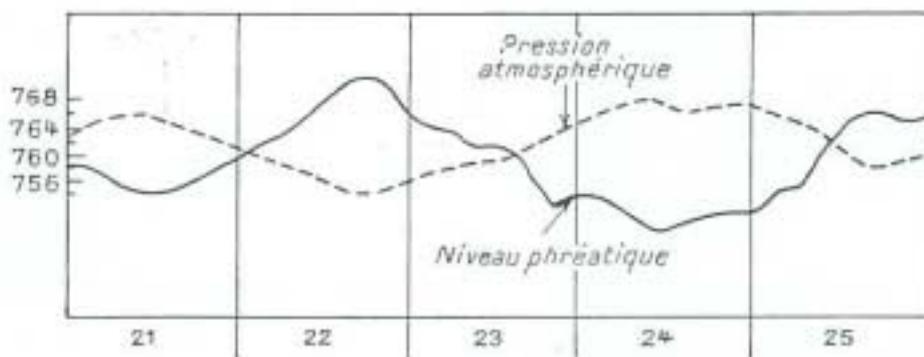


Figure 3: Variation diurne de la pression atmosphérique et niveau piézométrique observatoire central de Buenos Aires (Argentine). (D'après Raffo,...)

Bremond (1965) observait des variations du niveau de l'eau dans des puits atteignant une nappe captive, en parfaite corrélation avec la variation de la

pression atmosphérique. Il concluait que, dans ces cas, la nappe se comportait comme un véritable "baromètre à eau".

Callede (1977) a dit:

" A notre avis, le rôle joué par la variation de la pression atmosphérique reste strictement limité à des variation du niveau de la nappe (et dans la rivière) , dans des condition fonction du type de nappe et de ses dimensions. Sur une nappe libre , la variation du niveau peut être occasionnée par un évolution globale de la pression atmosphérique tandis que sur une nappe captive le facteur prépondérant sera la différence entre les valeurs de la pression atmosphérique s'exerçant extrémité de la nappe , là ou celle-ci devient libre.

En outre, il est loin d'être évident qu'une variation du niveau de la nappe , sous l'influence de la pression atmosphérique , entraîne obligatoirement une variation du débit de la nappe et, par conséquent, une variation du débit de la rivière . Seul le coefficient d'emmagasinement (c'est à dire le rapport entre le volume de sol) varie et , puisque durant la variation du niveau sous l'influence de la pression atmosphérique rien n'est soustrait ni apporté à la nappe , il y a fort peu de chances que son débit de rivière , alimentée par la nappe , ne changerait pas.

En plus, le cycle journalier de la variation de la pression atmosphérique diffère totalement du cycle de nos variations de hauteur de l'eau dans la rivière" .

Les études recensées semblent indiquer des corrélations significatives entre les variations de pressions atmosphériques et le niveau des nappes. Elles semblent indiquer également que certains types de nappes, dans certaines conditions, sont plus susceptibles d'être influencés par la pression atmosphérique. Par exemple, sur une nappe libre, la variation du niveau peut être occasionnée par une évolution globale de la pression atmosphérique tandis que sur une nappe captive, le facteur prépondérant sera la différence entre les valeurs de la pression atmosphérique s'exerçant à l'extrémité de la nappe où celle-ci devient libre.

Notons que, dans les études citées, l'apport pluviométrique n'est pas indiqué, alors que la pluie est probablement le premier facteur explicatif du niveau de la nappe.

2.2.2 Lien entre pression atmosphérique et débits

A notre connaissance, aucune étude ne s'est attachée à déterminer le lien entre la pression atmosphérique et le débit des rivières. Cependant on peut penser que, pour certains bassins versants ayant des nappes influencées par la pression atmosphérique, les variations du niveau de la nappe entraîneront des variations de débit.

2.3 Corrélations entre pression atmosphérique et débits des rivières

Ce paragraphe a pour objectif de mettre en évidence les relations possibles entre pression atmosphérique et débits à l'exutoire de bassins versants. Nous nous appuyons pour cela sur un échantillon de 262 bassins versants présentant des conditions hydro-climatiques variées.

2.3.1 Base de données utilisée

La base de données utilisée est issue de la base de données élaborée par Oudin (2004) et utilisée par Nejmeddine (2004). La description de cette base de données est inspirée en partie de ces travaux tout en englobant la base des données de pression atmosphérique. L'importance de la taille de l'échantillon permet de garantir la généralité des résultats obtenus.

La base de données utilisée est composée de 262 bassins localisés sur deux zones géographiquement différentes : aux Etats-Unis et en France

L'approche empirique de modélisation que nous nous proposons d'utiliser nécessite des données hydrologiques en quantité et en qualité suffisante, afin de pouvoir confronter les simulations de débits du modèle aux observations.

2.3.1.1 Données en France

Nous avons retenu 218 bassins. Ces bassins sont un sous-ensemble des bassins utilisés par Perrin (2000). Les données hydrométriques sont issues de la banque HYDRO du ministère d'Écologie et de Développement Durable et les données pluviométriques de la banque de données PLUVIO de Météo France.

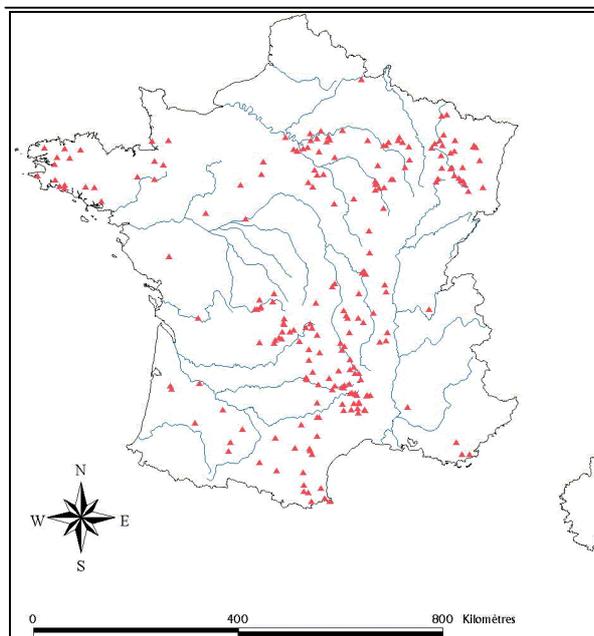


Figure 4 : Localisation des 218 stations hydrométriques françaises

2.3.1.2 Données aux États-Unis

Les données des 44 bassins américains sont issues de la base de données de Oudin (2004). Elles ont trois origines : la base de données de l'Agriculture Research Service (ARS), la base de données du Model Parameter Estimation Experiment (MOPEX) et la base de données élaborée à partir d'un système d'information géographique (SIG) en couplant les données de pluie, de débits et climatiques issues de plusieurs sources. Pour cette dernière base de données, les données de pluie journalière sont disponibles via Internet par de multiples sources. Les autres données sont fournies par les sites Internet de l'Agricultural Research Service (ARS), de l'United States Department of Agricultural (USDA) et le Carbone Dioxyde Information Centre (CDIAC). Les données de débits ont été obtenues à partir du site Internet de l'United States Geological Survey (USGS). Enfin, les données climatiques (ETP et pression atmosphérique) sont issues du CD-ROM Solar And Meteorological Surface Observation Network (NOAA, 1993) qui fournit des données journalières pour localisées 237 stations réparties aux États-Unis.

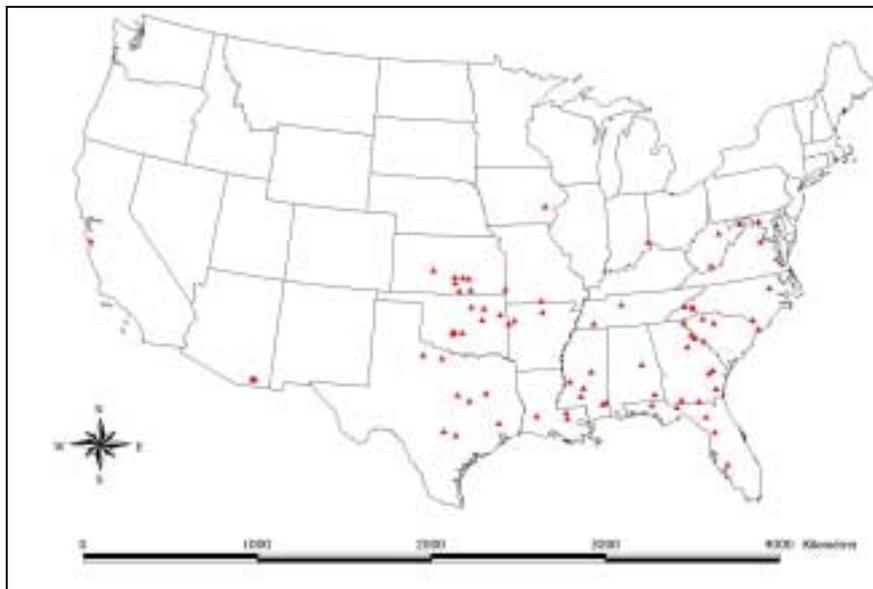


Figure 5 : Localisation des 44 stations hydrométriques américaines

2.3.1.3 Caractéristiques et critique des données (d'après Oudin, 2004)

Diverses conditions hydro-climatiques sont représentées sur ces bassins. Les principales caractéristiques moyennes annuelles sont indiquées dans le Tableau 1.

Pays	France	État Unis
Nombre de bassins	218	44
Nombre de stations météorologiques utilisées	31	40
ETP Penman annuelles moyennes (mm/an)	690 – 1340	995 – 1633
Températures annuelles moyennes (°C)	9.2 – 16.0	9.0 – 22.3
Précipitations moyennes annuelles (mm/an)	616 – 1942	294 – 2025
Débits moyens annuels (mm/an)	23 – 1937	1 – 1140
Climats représentés	Tempéré : méditerranéen, continental, océanique	Tempéré continental, subtropical sec et humide, sec semi-aride

Tableau 1 : Caractéristiques hydro-climatiques des 262 bassins par situation géographique

La diversité climatique de l'échantillon de bassins utilisés dans notre étude est très importante. Elle permet notamment d'approcher le problème sans favoriser une zone climatique par rapport à une autre. D'après la classification de Köppen (1931), les climats représentés appartiennent aux groupes des climats secs, subtropicaux et tempérés, avec pour chaque groupe, plusieurs types rencontrés. Les climats montagnard, subarctique et polaire, ont été évités car ils présentaient trop de précipitations neigeuses. Le climat tropical est le seul groupe faisant défaut à notre échantillon.

La superficie des bassins versants varie entre 5,2 et 12 931 km², avec une superficie médiane de 160 km². 20 % des bassins ont une superficie inférieure à 20 km² et 10 % ont une superficie supérieure à 2 000 km² (Figure 6). On peut noter sur la Figure 6 que les bassins américains sont généralement plus grands que les bassins français puisque la valeur médiane des bassins américains est de 2 800 km².

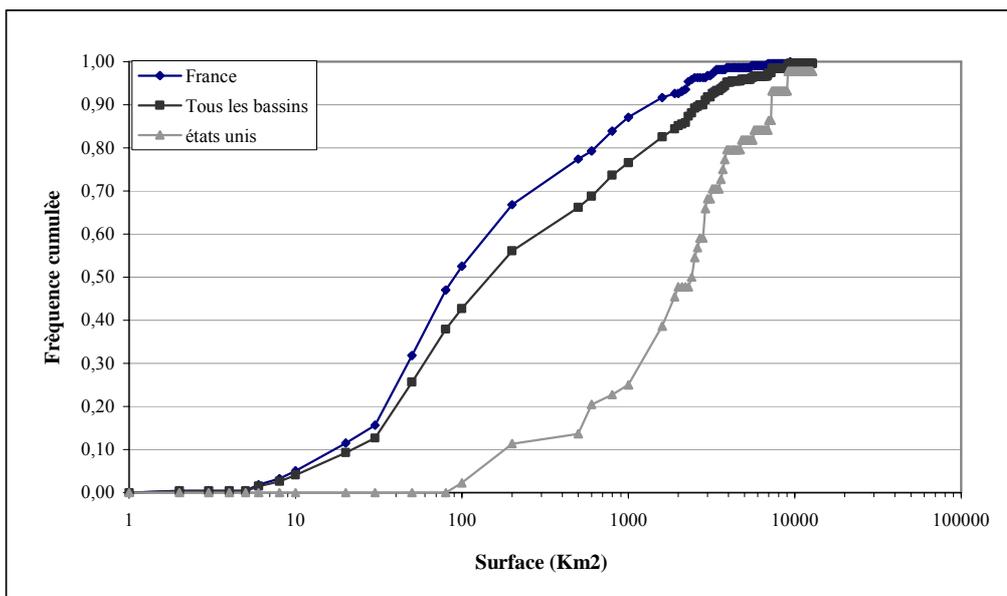


Figure 6 : Distribution des surfaces des 262 bassins versants

Afin de rendre compte de la diversité hydro-climatique de l'échantillon testé, nous avons représenté les distributions de quelques paramètres hydro-climatiques usuels :

- La pluie moyenne annuelle ;
- Le débit moyen annuel ;
- L'ETP moyenne annuelle calculée par la formule de Penman ;
- Le coefficient de rendement (P/Q) ;
- L'indice d'aridité (ETP/P).

La Figure 7 donne les distributions des trois premiers paramètres, selon la situation géographique des bassins versants considérés. On peut constater que la pluie moyenne annuelle prend des valeurs assez semblables pour les bassins américains et français. La variabilité de ce paramètre est toutefois assez importante au sein de ces échantillons, avec une répartition assez homogène entre la valeur minimale (autour de 500 mm/an) et maximale (autour de 2000 mm/an). En revanche, les bassins américains ont des débits moyens annuels plus faibles que les bassins français.

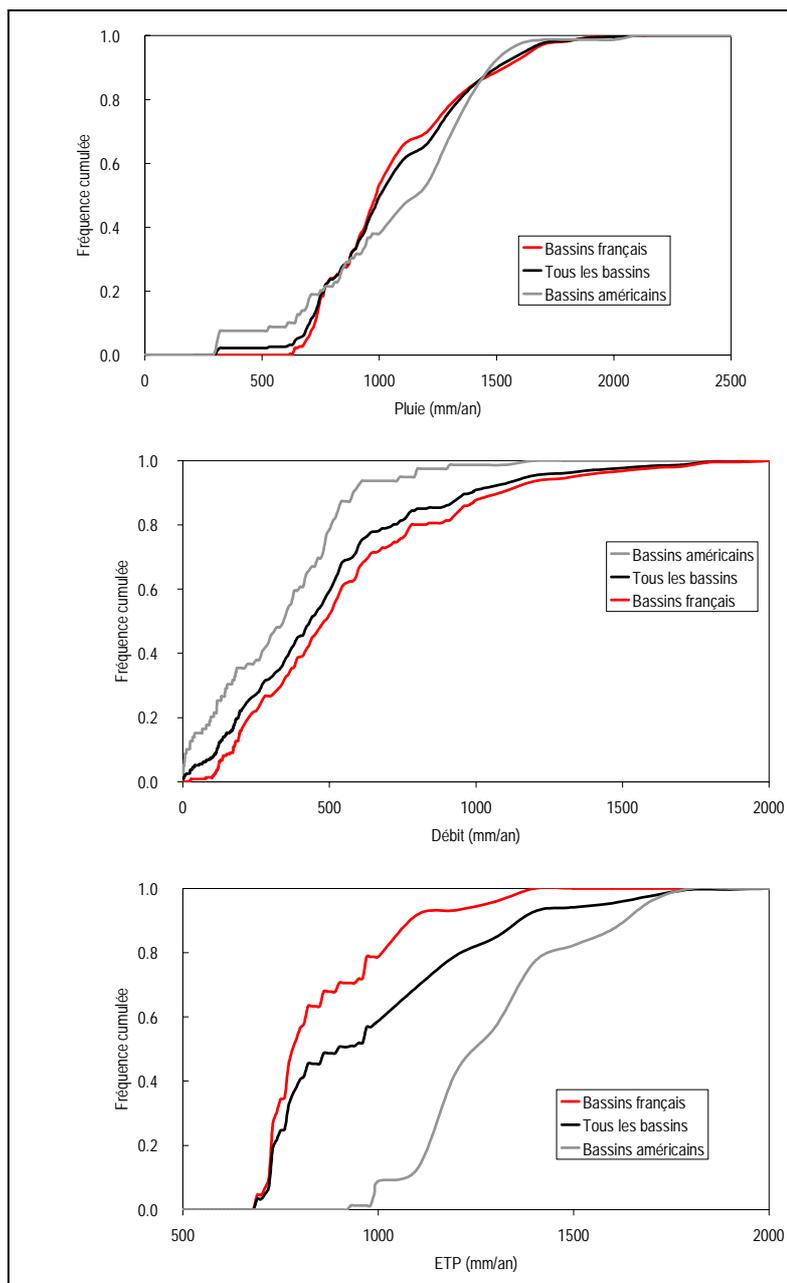


Figure 7 : Distribution de divers paramètres hydro-climatiques des 262 bassins versants selon leur situation géographique

La Figure 8 montre les distributions des coefficients de rendement et des indices d'aridité, selon la situation géographique des bassins versants considérés. Cette figure confirme les graphiques précédents : les bassins américains ont des comportements plus arides que les bassins français. En effet, nous nous sommes restreints, pour les bassins américains, aux bassins situés sur le quart sud-est du territoire. Ainsi, les bassins obtenus sont souvent situés au Texas, en Arizona ou au Kansas.

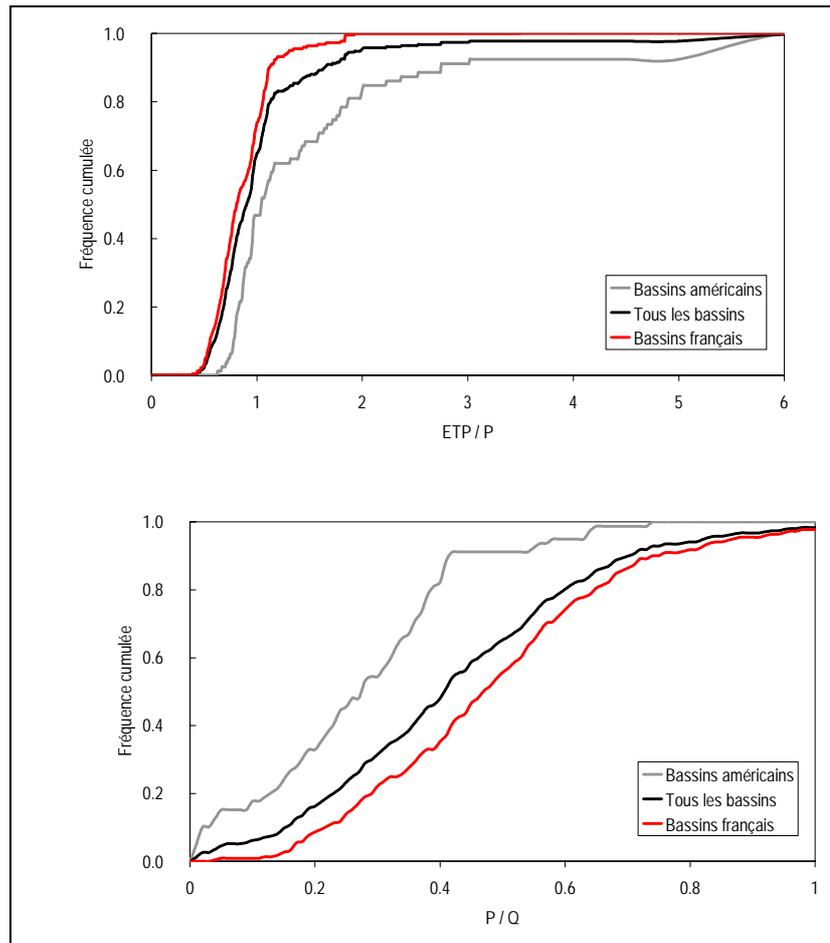


Figure 8 : Distribution de l'indice d'aridité (ETP / P) et du coefficient de rendement (P / Q) des 262 bassins versants selon leur situation géographique

2.3.2 Approche descriptive

Dans cette partie, nous souhaitons répondre aux questions suivantes : est-ce qu'il y a un lien entre pression atmosphérique et débit ? Des bassins sont-ils plus sensibles aux variations de pression atmosphérique ? Si oui, quelles sont les caractéristiques de ces bassins ?

Pour cette approche, nous avons utilisé un programme permettant d'avoir de façon automatique et exhaustive les corrélations (au pas de temps journalier) entre pression atmosphérique et débit.

De plus, pour la comparaison, nous avons également cherché à déterminer les corrélations entre :

- ❑ Pluie et débit
- ❑ ETP et débit

- Pression atmosphérique et erreur de débit (erreur de débit = débit observé - débit simulé)
- Pluie et erreur de débit
- Pression atmosphérique et pluie.

Le résultat du programme permet de dresser les corrélogrammes (corrélations en fonction du décalage entre séries considérées).

Les bassins versants utilisés ici sont les bassins français présentés au paragraphe 2.3.1.1.

Les résultats obtenus par le programme de corrélation montrent que les corrélations entre débit et pression atmosphérique sont en général assez faibles, ne dépassant pas 0.3. Cependant, ce niveau de corrélation est semblable à celui observé entre débit et ETP. Afin d'avoir une idée du type de bassin où les corrélations entre pression et débit sont les plus importantes (les moins faibles), nous avons dressé une carte de perméabilité en y superposant le niveau de corrélation maximale (optimum du corrélogramme pression/débit) pour tous les bassins français. (Figure 9)

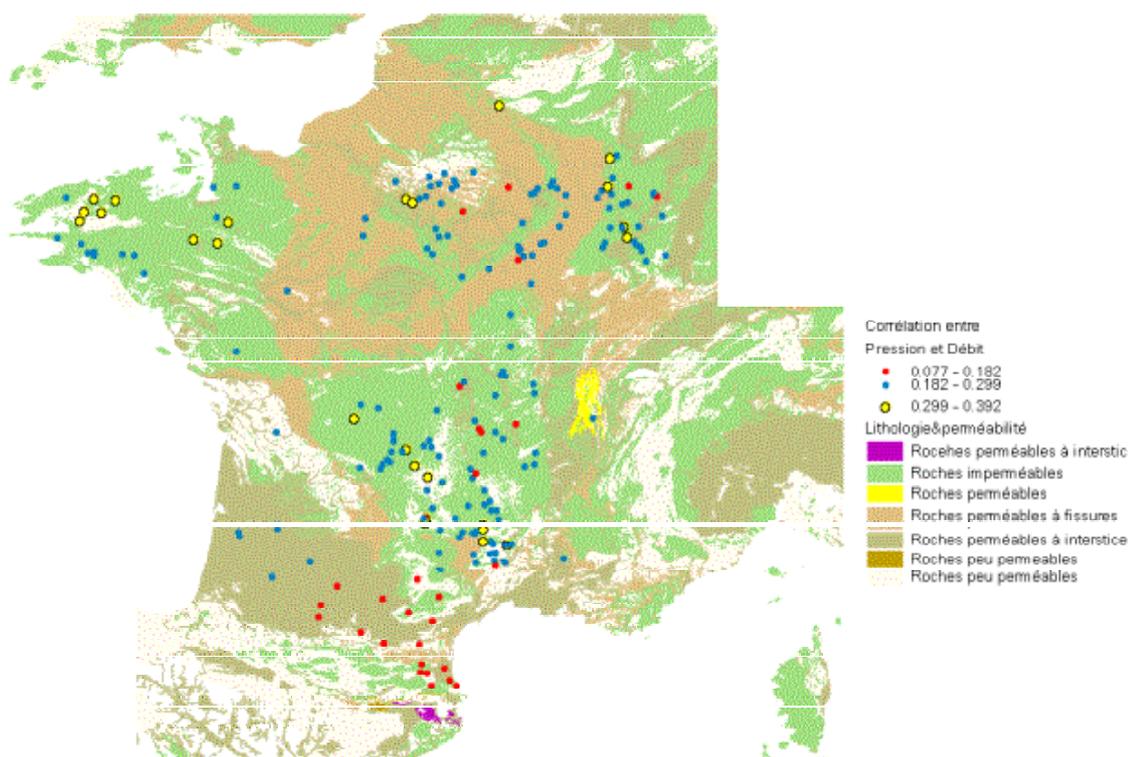


Figure 9: Carte de perméabilité avec des valeurs de corrélation entre pression et débit

On peut voir sur cette carte de nappes d'eau souterraines que les bassins où il y a une corrélation forte entre pression et débit, sont dans des zones à nappe locales ou perméables.

Les bassins où la corrélation pression/débit est importante sont localisés dans trois zones géographiques : la Bretagne, de la Moselle, du Massif central et du

Nord-Est du bassin parisien. Cependant, notons que, dans le même temps, il existe sur ces bassins de fortes corrélations entre pluie et débit (cf. Figure 10). Ainsi, il semble que les corrélations entre pression et débit sur ces zones soient liées aux corrélations entre pluie et débit. Autrement dit, la pression et la pluie ne sont pas des variables indépendantes, ce qui rend difficile l'interprétation des corrélations pression/débit.

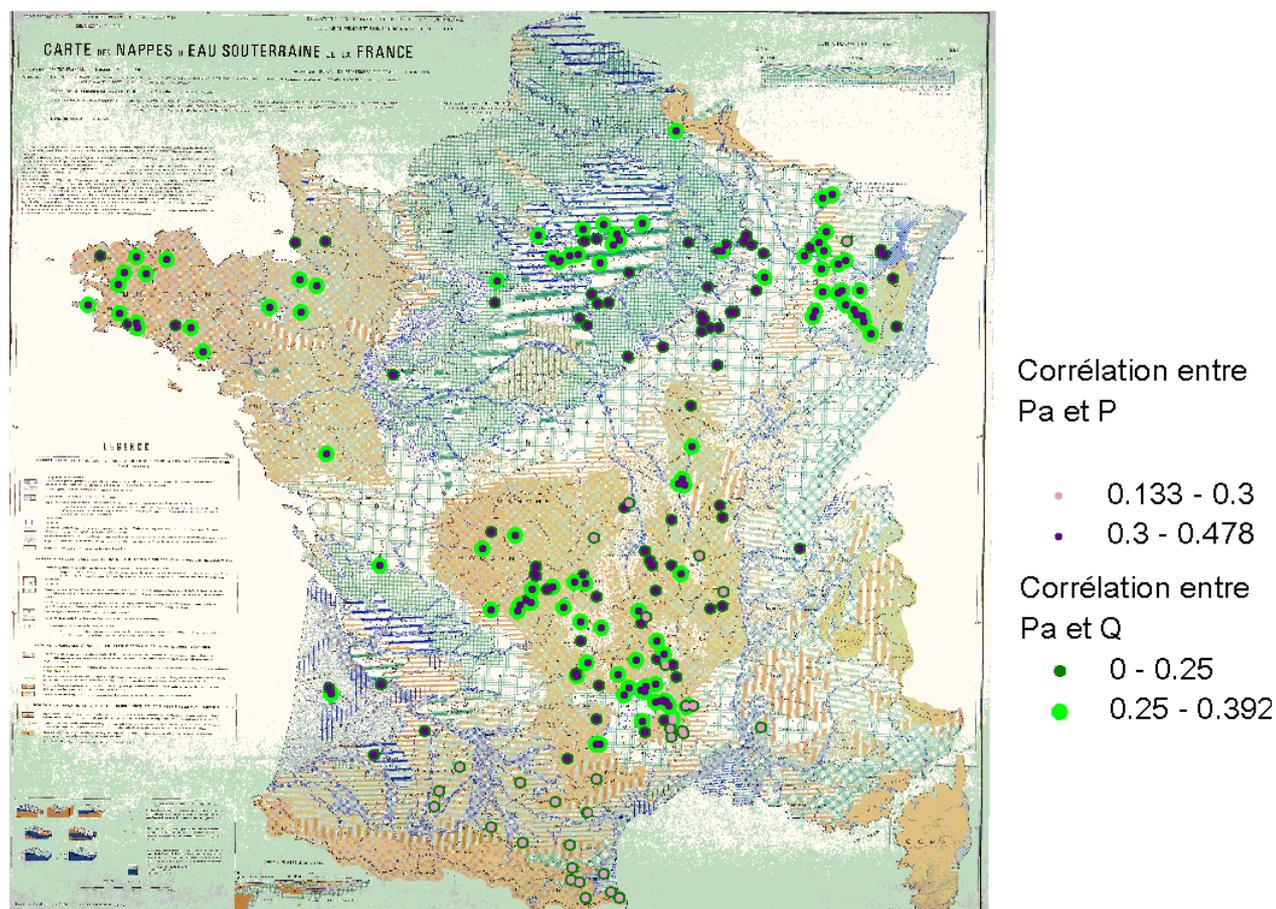


Figure 10: Cartes des nappes d'eau souterraine de la France, avec corrélation entre pression atmosphérique et pluie et pression atmosphérique et débit.

A titre de comparaison, nous avons également dressé la carte des corrélations entre ETP et débit et entre pluie et débit (cf. Figure 11 et Figure 12).

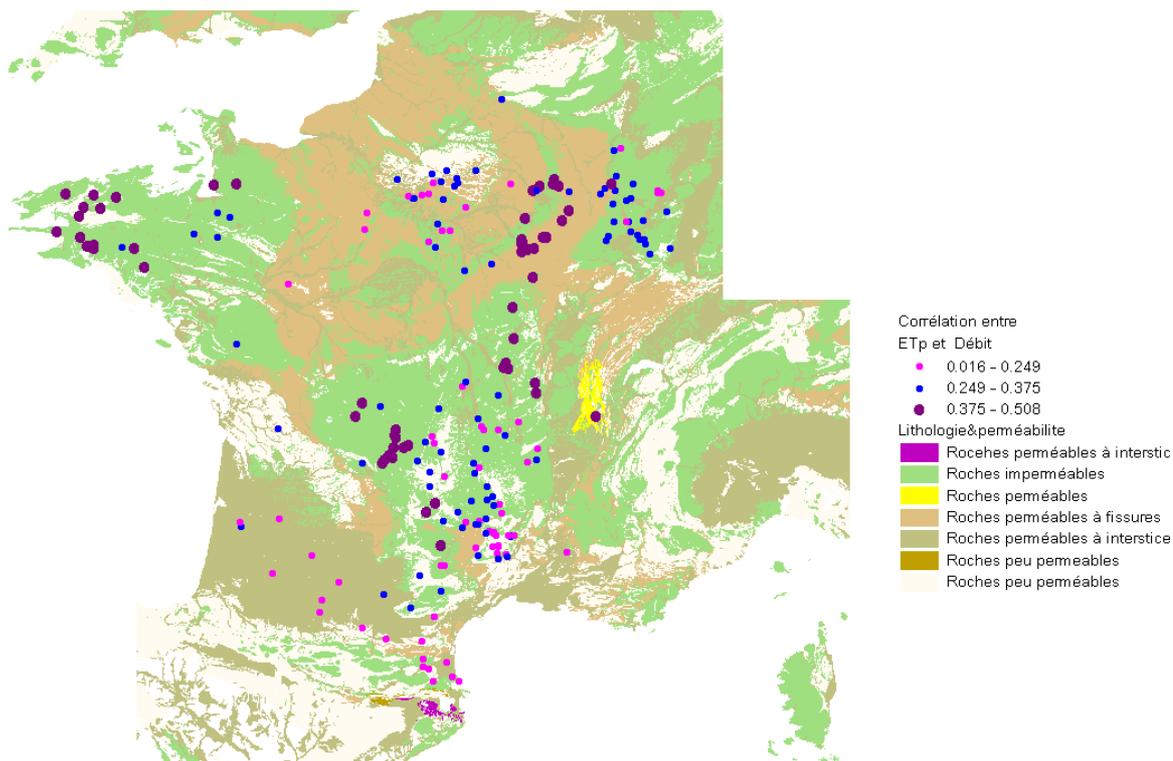


Figure 11: carte de perméabilité avec des valeurs de corrélation entre évapotranspiration et débit

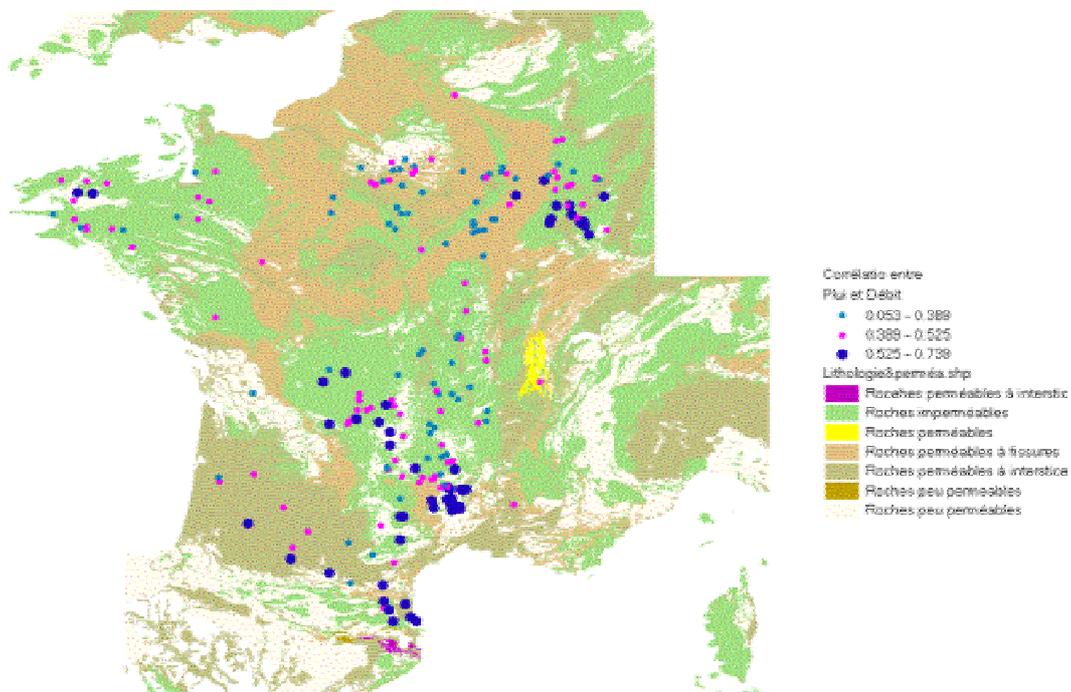


Figure 12: : carte de perméabilité avec des valeurs de corrélation entre pluie et débit

Plusieurs conclusions peuvent être tirées de ces cartes :

1. Le débit est le plus corrélé avec la pluie, puis l'ETP, puis la pression atmosphérique, ce qui était attendu ;
2. Même si l'ETP est plus corrélée au débit que la pression, les niveaux de corrélations de ces deux variables sont proches. Ainsi, on peut penser que cette variable peut présenter un intérêt pour expliquer les débits, même si cela reste à vérifier par des recherches supplémentaires d'observation et/ou de modélisation ;
3. Les corrélations entre pression et débit peuvent cacher les corrélations existant entre pluie et débit, étant donné que la pluie et la pression atmosphérique sont très liées sur quelques bassins (notamment les bassins bretons).

Afin d'approfondir notre démarche descriptive, nous nous sommes intéressés aux bassins pour lesquels les corrélations entre débit et pression étaient importantes et où les corrélations entre pression et pluie étaient faibles.

Deux bassins ont été considérés (cf. localisation sur la Figure 13) :

1. GARDON DE SAINT GERMAIN à LA BASTIDE
2. GARDON DE SAINT MARTIN à LA ROQUETTE

Ces bassins sont situés dans des régions à petites nappes très localisées et limitées, mais dépourvues de nappe étendue: terrains cristallins, métamorphiques, schisteux des massifs anciens. De plus, ces bassins sont caractérisés par des roches peu perméables (cf. Figure 13).

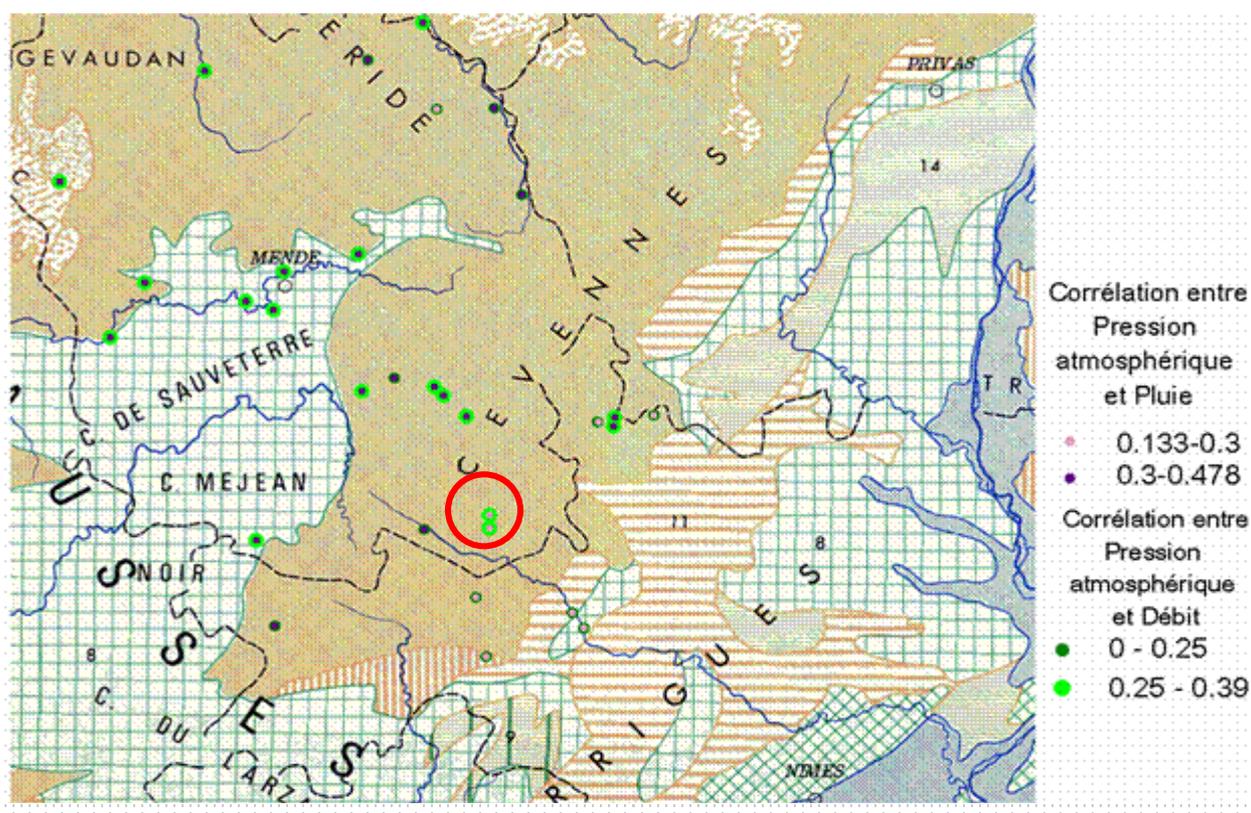


Figure 13: Carte de localisation des deux bassins du Gardon

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons cherché à déterminer le rôle de la pression atmosphérique dans la transformation de la pluie en débit.

Dans un premier temps, nous avons recensé les études existantes ayant traité de la pression atmosphérique en hydrologie. Ces études semblent indiquer des corrélations significatives entre les variations de pressions atmosphériques et le niveau des nappes. En revanche, très peu d'études se sont attachées à déterminer le lien entre la pression atmosphérique et le débit des rivières.

Afin d'avoir une idée des liens entre pression et débit des rivières, nous avons suivi une approche descriptive sur un large échantillon de bassins versants. A notre connaissance, aucune étude n'a été effectuée à ce sujet et à cette échelle, ce qui peut paraître surprenant puisque les variations du niveau de la nappe dues aux variations de pression atmosphérique peuvent entraîner des variations de débit.

L'étude a porté sur 221 bassins versants, localisés pour la plupart en France. Nous nous sommes appuyés sur l'analyse des corrélations entre pression et débit et, à titre de comparaison, entre débit et ETP et entre débit et pluie. Nous

avons vu que le débit est le plus corrélé avec la pluie, mais aussi que les niveaux de corrélations ETP/débit et pression/débit étaient proches. Ainsi, la variable pression peut présenter un intérêt pour expliquer les variations de débits.

Nous tenterons d'infirmier ou de confirmer cette hypothèse dans le chapitre suivant par une approche de modélisation.

3

Peut-on bénéficier de la connaissance de la pression atmosphérique en modélisation pluie-débit ?

3.1 Introduction

Cette partie tente d'apporter des éléments de réponse à la question suivante : *Peut-on bénéficier de la connaissance de la pression atmosphérique en modélisation pluie-débit ?*

Si l'influence de la pression atmosphérique est mise en évidence, sa prise en compte explicite lors de la modélisation pluie-débit pourrait alors apporter des améliorations sur la simulation des débits par ces modèles. En effet, face à certaines mauvaises performances des modèles, on peut imaginer les améliorer en intégrant des données nouvelles.

Dans le cas du modèle GR4J par exemple, des améliorations ont été apportées en modifiant la prise en compte de l'évapotranspiration potentielle (Oudin, 2004), mais dans la plupart des situations (c'est-à-dire pour un bassin et une période donnés), les performances de ce modèle restent modestes. L'idée est donc de déterminer si la pression atmosphérique peut apporter des améliorations supplémentaires à ce modèle.

3.2 Modèle utilisé

3.2.1 Quelques généralités sur la modélisation pluie-débit

Les processus intervenant dans le cycle de l'eau ont une grande complexité. C'est pourquoi les hydrologues admettent en avoir une connaissance partielle. La modélisation hydrologique est un moyen d'aborder cette complexité. Elle a

pour objectif la représentation des processus de tout ou d'une partie du cycle de l'eau. Cependant, un modèle est souvent une simplification de la réalité, dépendante à la fois du modélisateur et de l'objectif poursuivi. Le système représenté par la modélisation pluie-débit est, en règle générale, le bassin versant. Il existe une grande diversité de modèles, il est possible de les classer selon des caractéristiques communes :

- Les modèles " boîte noire "

L'approche " boîte noire " cherche à trouver des liens entre les entrées et les sorties du système (bassin versant) considéré comme une boîte noire. On peut citer par exemple les modèles auto régressifs à moyenne mobile de type ARMAX (Auto-Regressive Moving Average with eXogenous inputs), ou ceux reposant sur une simple équation non linéaire qui donne directement le débit en fonction des pluies antérieures. Ils font partie des modèles hydrologiques les plus simples.

- Les modèles " à réservoirs ", conceptuels ou empiriques

Les modèles de cette classe conceptualisent le bassin en un ensemble de réservoirs interconnectés. Le comportement des réservoirs est régi par des fonctions mathématiques décrivant le mouvement de l'eau. Ces modèles sont donc moins abstraits que les modèles " boîte noire" dans leur représentation de la transformation pluie-débit. Cependant leur interprétation physique n'est généralement pas immédiate. Ils sont structurés généralement à partir de deux composantes : une fonction de production permettant la détermination des bilans en eau, c'est-à-dire la répartition de la pluie brute en pluie efficace, en quantité évaporée et en quantité stockée ; et une fonction de transfert qui permet de répartir dans le temps la quantité d'eau transitant dans le cours d'eau. On utilise dans cette étude un modèle de type global conceptuel : GR4J.

- Les modèles fondés sur la physique

Le principe de cette catégorie de modèle est de tenter de donner des explications physiques au comportement hydrologique du bassin versant. Ils utilisent des relations physiques caractérisant les processus ayant lieu sur le bassin (écoulement de surface et de subsurface, infiltration...). Ils tiennent compte de la variabilité spatiale du bassin par une discrétisation fine à base de mailles sur lesquelles sont appliquées les lois concernées. Ces modèles sont difficiles à mettre en œuvre car ils demandent beaucoup de données et font appel à de nombreux paramètres. Ils sont difficilement utilisables dans un contexte opérationnel et sont plutôt réservés à un objectif de recherche.

3.2.2 Structure du modèle GR4J

Les formulations mathématiques du modèle GR4J sont fournies en annexe, nous présenterons ici uniquement le diagramme du modèle ainsi que les paramètres en jeu.

Le modèle GR4J : modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier (Perrin et al., 2003) est un modèle conceptuel global à quatre paramètres à caler. La version retenue ici est celle mise au point par Perrin (2000). La Figure 14 donne le schéma de la version de GR4J utilisée.

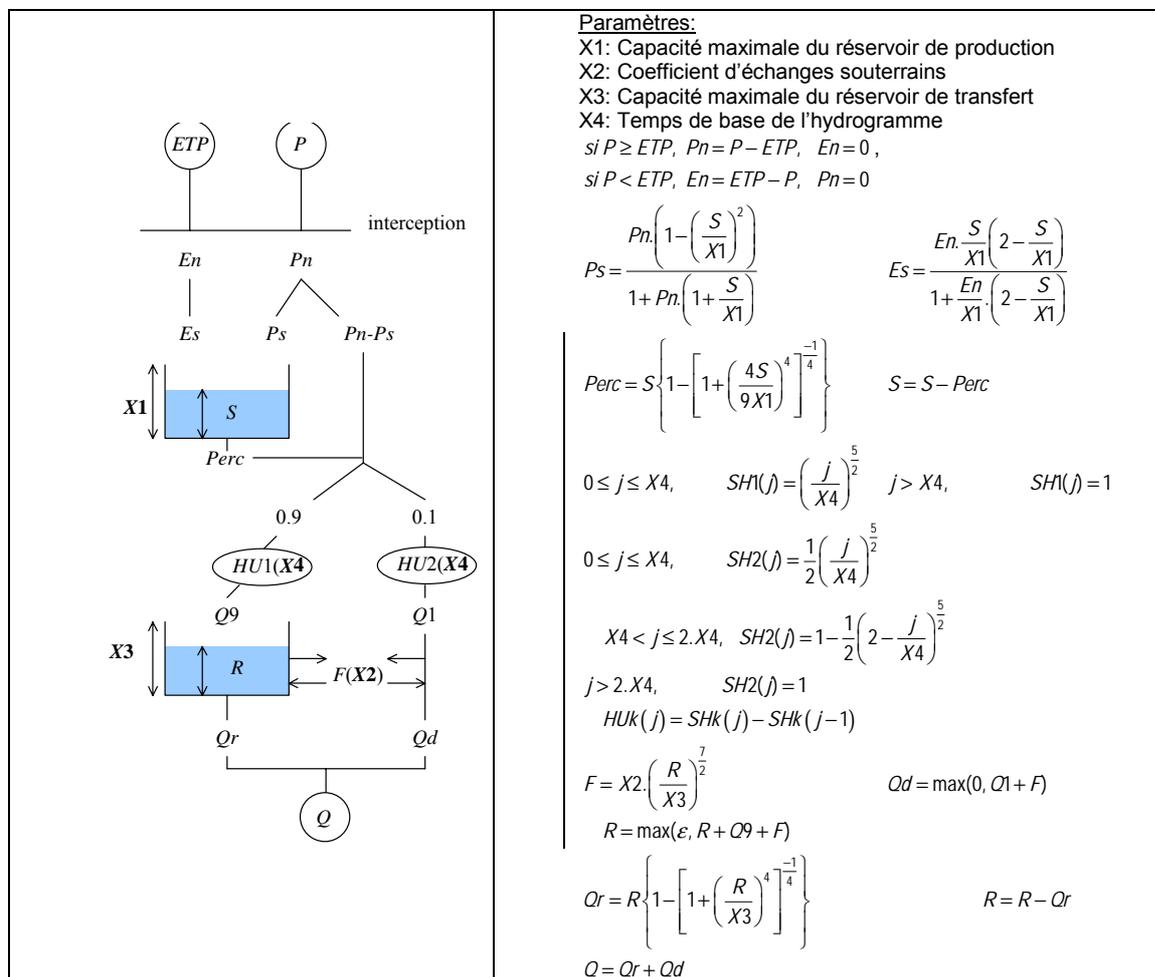


Figure 14 : Schéma et calculs effectués au sein du modèle GR4J (d'après Perrin, 2000)

L'optimisation des paramètres d'un modèle pluie – débit a pour but de trouver le jeu de paramètres qui permet de simuler les plus fidèlement possible le comportement réel du bassin modélisé. La similitude entre simulation et réalité est quantifiée par un critère de qualité sur les débits. Le calage demande donc le choix à la fois d'un critère de qualité, d'une méthode pour identifier les paramètres, ainsi que de séries de données destinées à fournir l'information nécessaire au calage.

La méthode « pas-à-pas » (Michel, 1989 ; Nascimento, 1995) a été développée au Cemagref d'Antony. C'est une méthode locale qui opère une optimisation (maximisation ou minimisation) d'une fonction objectif choisie par l'utilisateur (indépendamment de la méthode).

Le processus d'optimisation est itératif. La méthode adopte une stratégie de déplacement, la plupart du temps, le long des axes de l'espace des paramètres, avec un pas de recherche pouvant varier d'une itération à l'autre. L'amplitude du

pas de recherche étant ici la même pour tous les paramètres, des transformations mathématiques préalable (transformation logarithmique ou puissance par exemple) peuvent être appliquées pour garantir des sensibilités grossièrement équivalentes à ce pas de recherche pour tous les paramètres.

3.2.3 Evaluation des performances du modèle

Un modèle permet de produire des chroniques de débit Q_{calc} à partir de données (les entrées du modèle) de pluie P , et d'évapotranspiration potentielle ETP . Le modèle sera d'autant plus satisfaisant que les débits Q_{calc} seront proches des débits observés Q_{obs} . Apprécier la validité du modèle consiste donc à juger de la proximité des deux séries temporelles Q_{obs} et Q_{calc} . Pour ce faire, deux approches sont possibles :

Une approche qualitative : elle consiste à représenter graphiquement les valeurs observées et simulées, et à partir d'une évaluation visuelle, apporter un jugement sur la qualité de la simulation.

Il est évident qu'un tel jugement est rendu difficile lorsqu'il faut comparer des simulations de modèle sur de nombreux bassins versants.

Une approche quantitative : de nombreux critères d'évaluation, indépendants du jugement de l'observateur, sont cités dans la littérature hydrologique. Le plus connu et le plus utilisé est le critère de Nash et Sutcliffe (1970) :

$$Nash = 100 \left[1 - \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum (Q_{obs} - \overline{Q_m})^2} \right]$$

Q_{obs} = Débit observé

Q_{sim} = Débit simulé

$\overline{Q_m}$ = la moyenne des débits observés.

Nous aurons une simulation parfaite pour un Nash égal à 100. Plus le critère est faible, moins la simulation est proche de la réalité. La valeur 0 correspond aux performances du modèle dit « naïf », qui consiste à garder une valeur constante pour le débit simulé au cours du temps, égale à la moyenne des débits observés sur la période considérée. Pour un critère de Nash négatif, la simulation est encore moins bonne que si l'on avait utilisé ce modèle naïf.

Ce critère peut être appliqué à d'autres variables que le débit, notamment celle qui évalue les écarts entre les \sqrt{Q} :

$$Nash(\sqrt{Q}) = 100 \left[1 - \frac{\sum (\sqrt{Q_{obs}} - \sqrt{Q_{sim}})^2}{\sum (\sqrt{Q_{obs}} - \sqrt{Q_m})^2} \right]$$

Cette expression permet de réduire l'importance des forts débits dans l'évaluation de la simulation. On rééquilibre ainsi le poids des débits d'étiage par rapport à celui des débits de crue.

Le choix de la forme du critère dépend de l'objectif de la modélisation : Nash (Q) évalue majoritairement l'aptitude du modèle à simuler des débits de crue, alors que Nash (log Q) focalise surtout les écarts en période d'étiage. Nash \sqrt{Q} est un compromis entre ces deux extrêmes. Il s'agit d'un critère d'évaluation objectif qui ne donne pas démesurément plus de poids aux faibles débits ni aux forts. Utilisé pour le calage du modèle, c'est le critère qui offre le plus de robustesse pour la validation (Perrin, 2000)

3.3 Approche empirique

3.3.1 Méthodologie

3.3.1.1 Présentation générale

La méthodologie est basée sur une approche empirique ayant recours à la modélisation pluie-débit. Nous avons utilisé le modèle GR4J, mais la démarche suivie pourrait également être appliquée à d'autres modèles pluie-débit. Ce modèle a été préféré à d'autres car il est de structure simple et offre ainsi des possibilités de raffinement de certaines de ses parties, dans la perspective d'une prise en compte de la pression atmosphérique.

La difficulté est de savoir comment intégrer cette nouvelle donnée au sein de la structure du modèle, comme l'illustre la Figure 15. En effet, ce modèle n'est pas fondé sur la physique et il est difficile de savoir *a priori* à quel(s) endroit(s) la pression atmosphérique est susceptible de jouer un rôle.

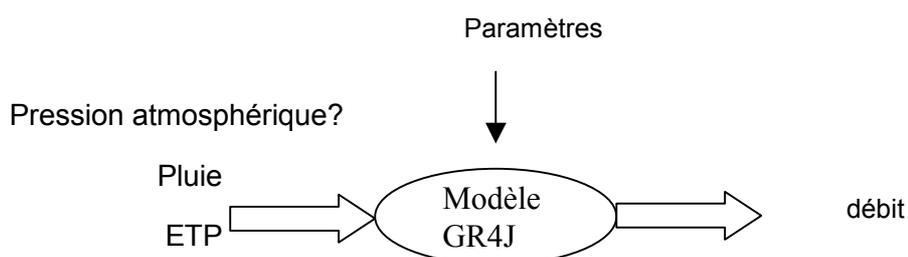


Figure 15 : Comment utiliser une donnée supplémentaire au sein du modèle GR4J ?

3.3.1.2 Indices de variations de la pression atmosphérique

Pour intégrer ces données de pression atmosphérique au sein de la structure du modèle GR4J, nous devons d'abord définir des indices de variations de pression atmosphérique. Ce choix était délicat et important puisque les résultats dépendront forcément de la pertinence du choix fait pour ces indices. Nous

avons déterminé trois indices de variations, notés K1, K2 et K3, dont les formulations sont indiquées ci-dessous :

$$K1 = \left(\frac{Pa_j}{Pa_{moyenne}} \right)^\alpha$$

$$K2 = \left(\frac{Pa_j}{Pa_{j-1}} \right)^\alpha$$

$$K3 = \left(\frac{Pa_j}{\frac{Pa_j + Pa_{j+1} + \dots + Pa_{j+10}}{10}} \right)^\alpha = \left(\frac{Pa_j}{\frac{\sum_{j+1}^{j+10} Pa_j}{10}} \right)^\alpha$$

Pa_j = Pression journalière

Pa_{j-1} = Pression de jour d'avant

Pa_m = Pression moyenne

α = exposant variant de -75 à +75, permettant de tester de manière graduelle l'introduction des données de pression atmosphérique.

3.3.1.3 Assimilation des indices de variations de pression atmosphérique

Dans cette approche empirique, on teste différentes façons de prendre en compte la pression atmosphérique dans GR4J en faisant appel à des relations mathématiques liant la pression à différentes fonctions du modèle. Nous avons inséré ces relations dans le code du modèle GR4J.

Sept modifications du modèle ont été testées. Ces modifications n'ont pas de fondement physique, elles sont simples (généralement des multiplications de lames d'eau calculées par le modèle) et permettraient, le cas échéant, de donner des indications sur des modifications plus fines à apporter à la structure du modèle GR4J.

Nous verrons dans le paragraphe 3.4 comment raffiner ces modifications, en suivant une approche conceptuelle.

Les modifications apportées à la structure du modèle ont consisté à multiplier les lames d'eau calculées par les coefficients de variations de pression décrits précédemment. La Figure 16 et le Tableau 2 récapitulent les modifications apportées au modèle GR4J.

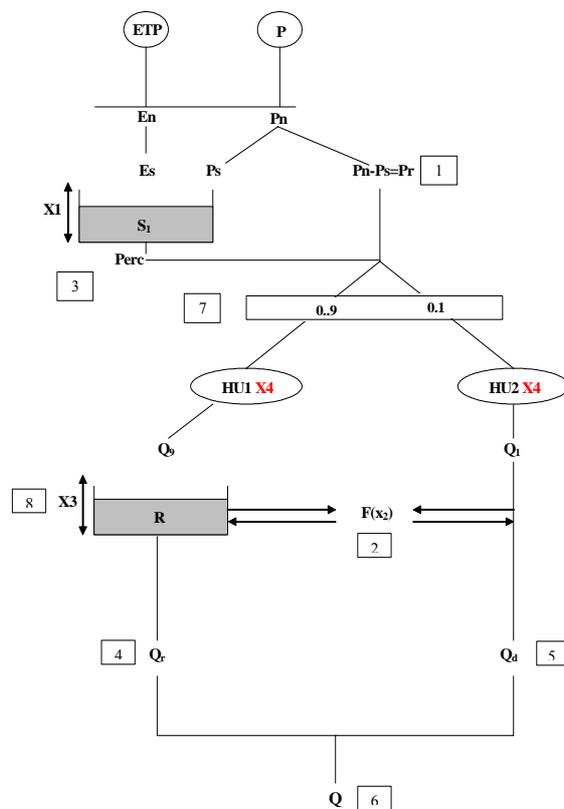


Figure 16 : Modifications apportées au modèle GR4J (les carrés correspondant au points d'application des coefficients K_1 , K_2 , K_3)

Notation	Point de modification	Formulation initiale	Formulation modifiée	Commentaires
M1	Pn, écoulement court-circuitant le réservoir Sol	$Pn - Ps = Pr$	$\frac{dP_r}{dP_n} = \left(\frac{S}{X1^2}\right)^2 * K_i$	
M2	F, échanges souterrains	$F = X2 \cdot \left(\frac{R}{X3}\right)^{\frac{7}{2}}$	$F = X2 \cdot \left(\frac{R}{X3}\right)^{\frac{7}{2}} * K_i$	
M3	Perc, Percolation du réservoir Sol	$Perc = S - \left(S^{-4} + \left(\frac{9}{4} \cdot X4\right)^{-4}\right)^{\frac{1}{4}}$	$perc = S - \left(S^{-4} + \left(\frac{9}{4} \cdot X4\right)^{-4}\right)^{\frac{1}{4}} * K_i$	
M4	Qr, écoulement du réservoir de transfert	$Q_r = R \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R}{X3}\right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\}$	$Q_r = R \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R}{X3}\right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\} * K_i$	
M5	Qd, écoulement court-circuitant le réservoir de transfert	$Qd = \max(0, Q1 + F)$	$Qd = \max(0, Q1 + F) * K_i$	
M6	Q, débit calculé	$Q = Qr + Qd$	$Q = Q * K_i$	
M7	Hydrogramme			

Tableau 2 : Modifications empiriques du modèle afin de tester l'utilisation de la pression en modélisation pluie-débit.

3.3.2 Présentation des résultats

3.3.2.1 Résultats généraux

Nous avons testé les différentes configurations de structure du modèle et d'indices de variations (un total de 21 structures ont été testées). Les résultats moyens sur les 262 bassins versants sont présentés en Annexe 2. Nous nous intéresserons ici aux résultats globaux pour chaque indice de variations de pression. La Figure 17 synthétise les résultats du premier test sur K1.

Les résultats montrent que les performances sont très voisines. Le modèle 4 (Qr, écoulement du réservoir de transfert) donne les meilleures performances. Dans ce modèle, l'introduction de la pression est faite en agissant sur le débit à la sortie du réservoir de transfert du modèle. Le modèle 6 donne les résultats les plus hétérogènes : il fournit le Nash le plus faible (32.7%) ainsi qu'une des valeurs de Nash les plus élevée (64.1%).

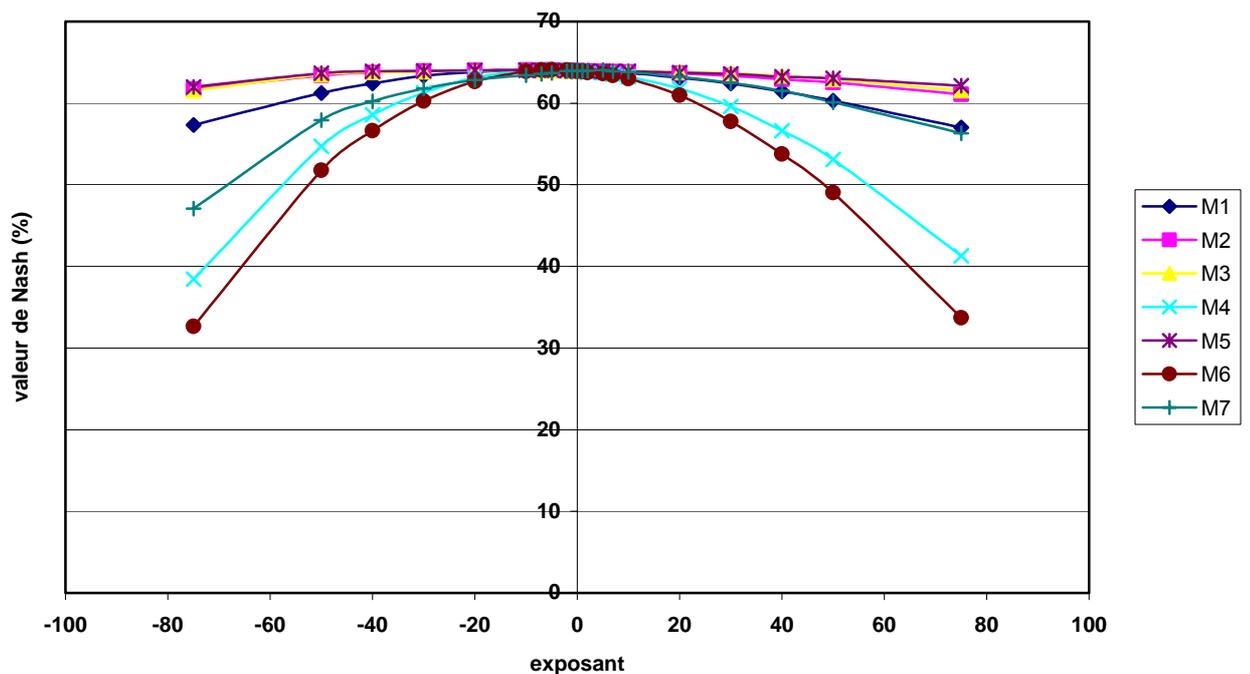


Figure 17 : Moyenne du critère de NASH obtenu pour K1 et les 7 modèles (modèle initiale est sur exposant =0)

La Figure 18 représente la distribution de performances correspondant à la série 1 (correspondant à K1), pour le modèle 1 et pour l'exposant égale -7 :

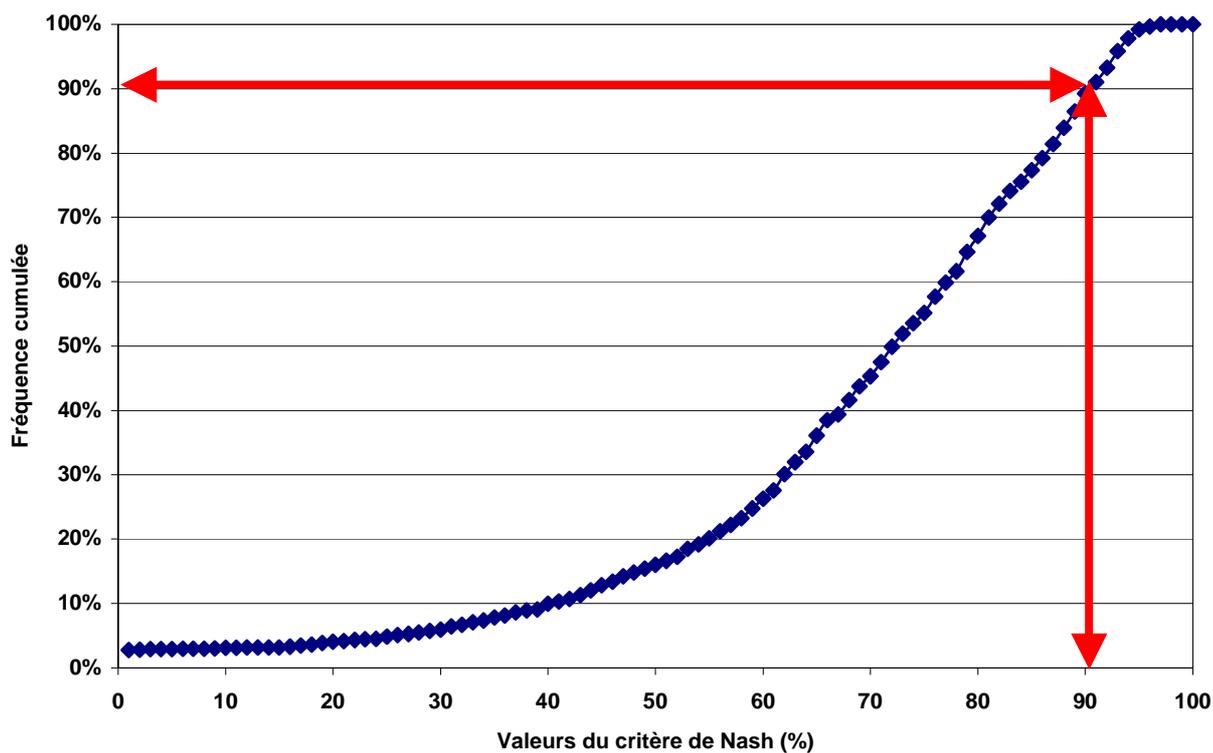


Figure 18 : graphe de valeur de critère de Nash et Fréquence cumulée sur le K1, M1

La Figure 18 a pour but d'expliquer la manière de lire et d'interpréter le graphique de la distribution des fréquences cumulées du critère de Nash. Pour l'exemple représenté par une flèche, sur 90% des bassins versants, on obtient une valeur du critère de Nash (inférieure à 90%).

La Figure 19 montre les différences entre le modèle initial et la modèle utilisant les données de pression atmosphérique. Nous pouvons voir que ces différences sont infimes.

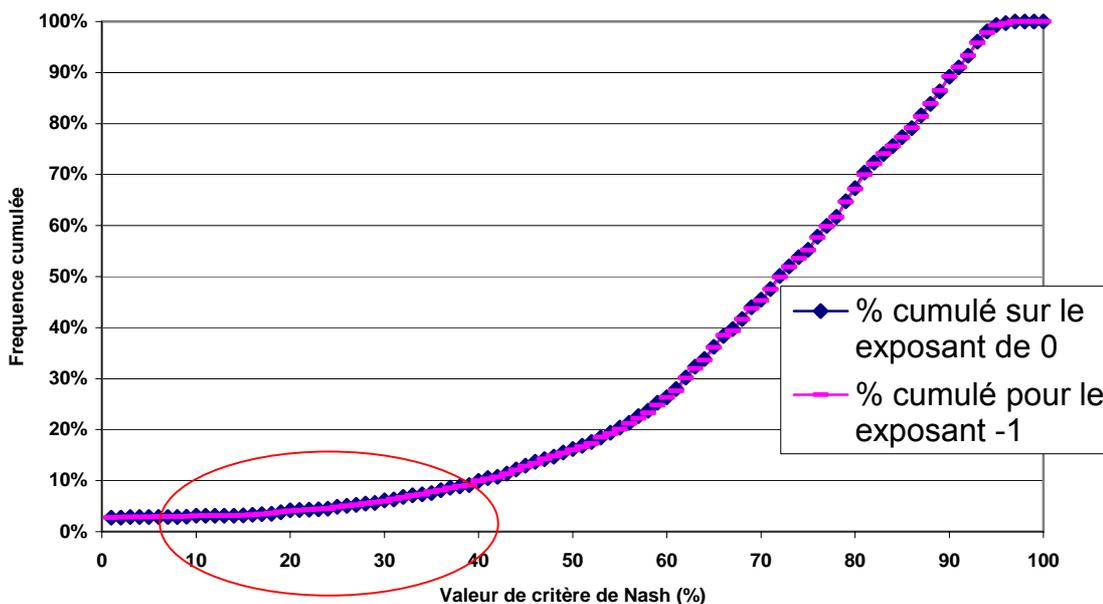


Figure 19: comparaison entre modèle initial et modèle prenant en compte la pression atmosphérique.

La Figure 21, montre toutes les valeurs du critère de Nash et les fréquences cumulées sur les 7 modèles avec le premier essai avec K1.

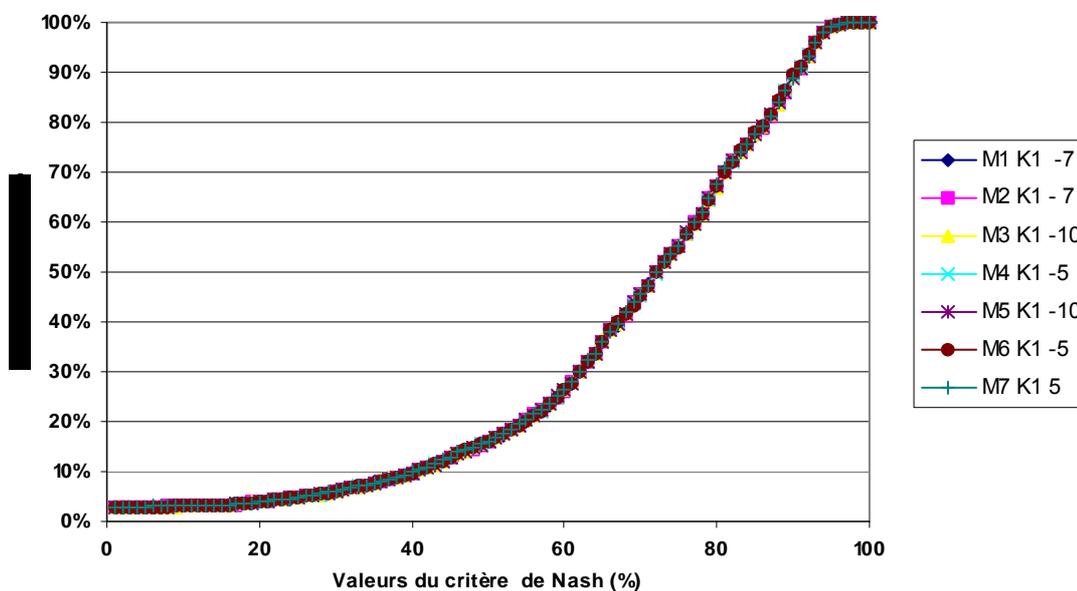


Figure 20 : valeur du critère de Nash et fréquence cumulée pour K1 avec l'ensemble des modèles

Les distributions de l'ensemble des modèles sont très proches et quasiment confondues, ce qui indique que les performances sont équivalentes quel que soit le mode d'introduction de la pression au sein du modèle.

La comparaison avec les performances du modèle initial (ne prenant pas en compte la pression atmosphérique) indique qu'avec le premier essai (K1) le modèle n'est pas amélioré.

Les résultats obtenus avec les deux autres indices (K2 et K3) sont présentés sur la Figure 21 et la Figure 22. Les meilleures performances sont obtenues pour le modèle M1 (NASH = 64.0) et avec l'exposant alpha égal à 7. Comme pour le premier essai (avec K1), les résultats des autres modèles restent cependant très proches.

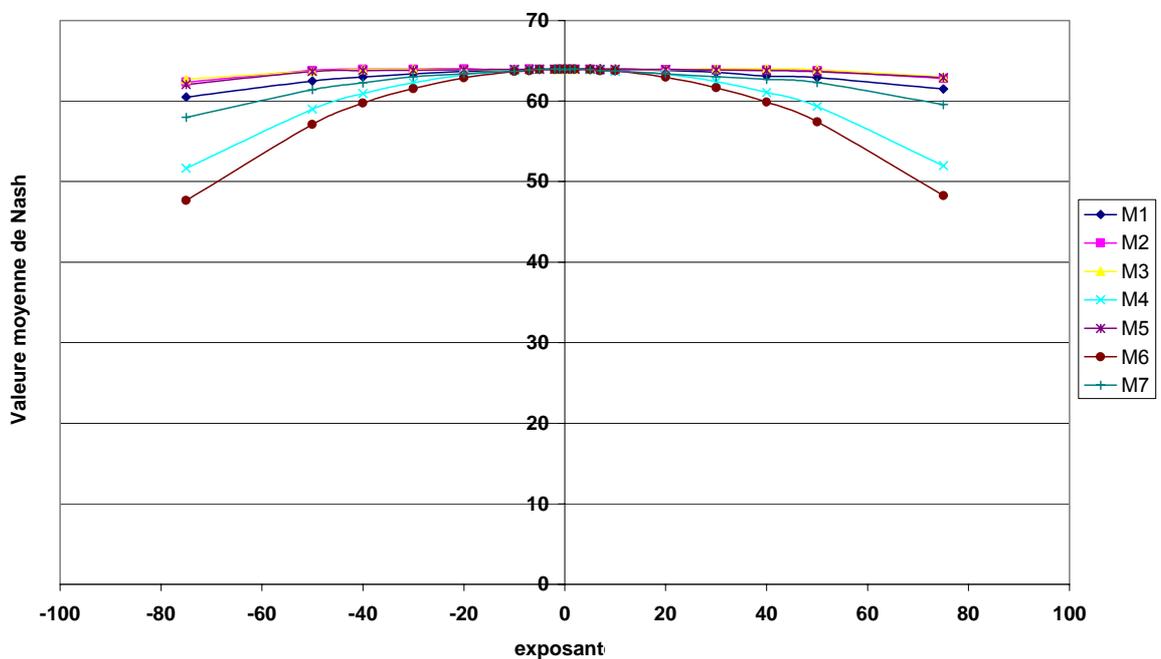


Figure 21: Moyenne du critère de NASH obtenu pour K2 et les 7 modèles

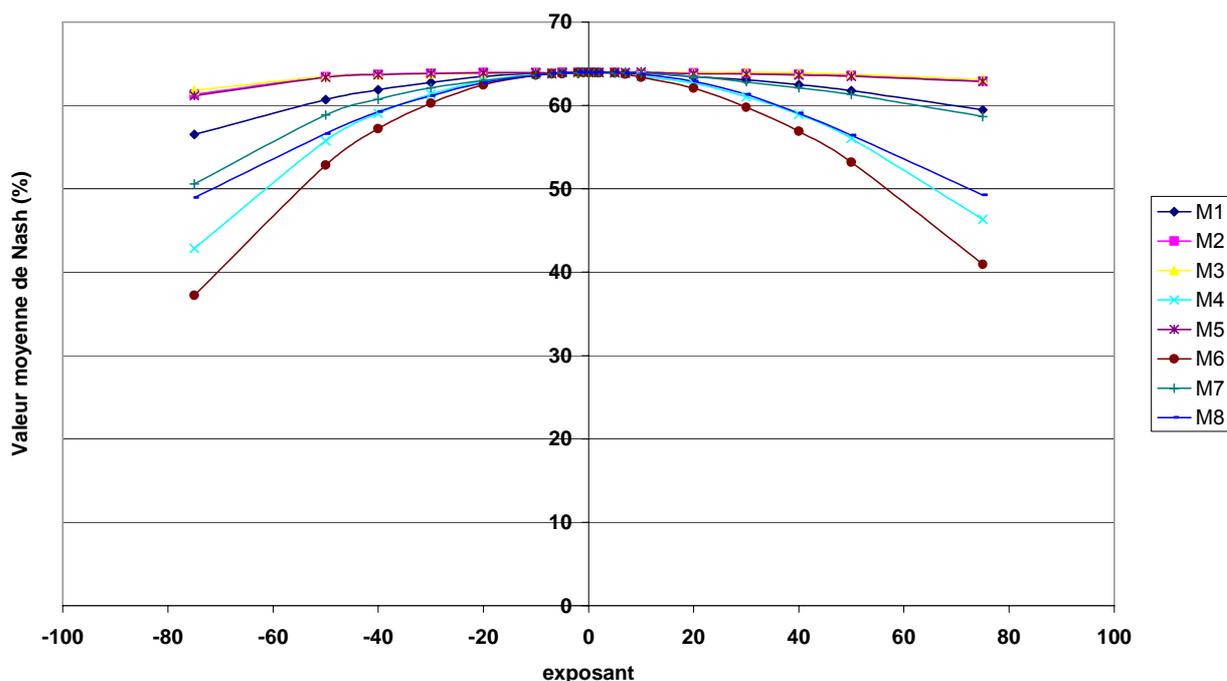


Figure 22: Moyenne du critère de NASH obtenu pour K3 et les 7 modèles

3.3.2.2 Les résultats dépendent-ils du critère de performance choisi ?

Pour répondre à cette question nous avons changé le critère d'évaluation des différentes structures de modèle testées.

Les critères choisis utilisent des transformations du débit, permettant ainsi de mieux rendre compte des performances du modèle lors des étiages (cas du critère utilisant les log) ou des crues (cas du critère sans transformation sur les débits) :

Critère de Débit :

$$Nash = 100 \left[1 - \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum (Q_{obs} - \bar{Q}_m)^2} \right]$$

Critère de Log Q :

$$Nash = 100 \left[1 - \frac{\sum (\log Q_{obs} - \log Q_{sim})^2}{\sum (\log Q_{obs} - \log \bar{Q}_m)^2} \right]$$

(Log : logarithme népérien)

Les résultats obtenus pour le critère de Nash sur les logarithmes des débits sont indiqués sur la Figure 23.

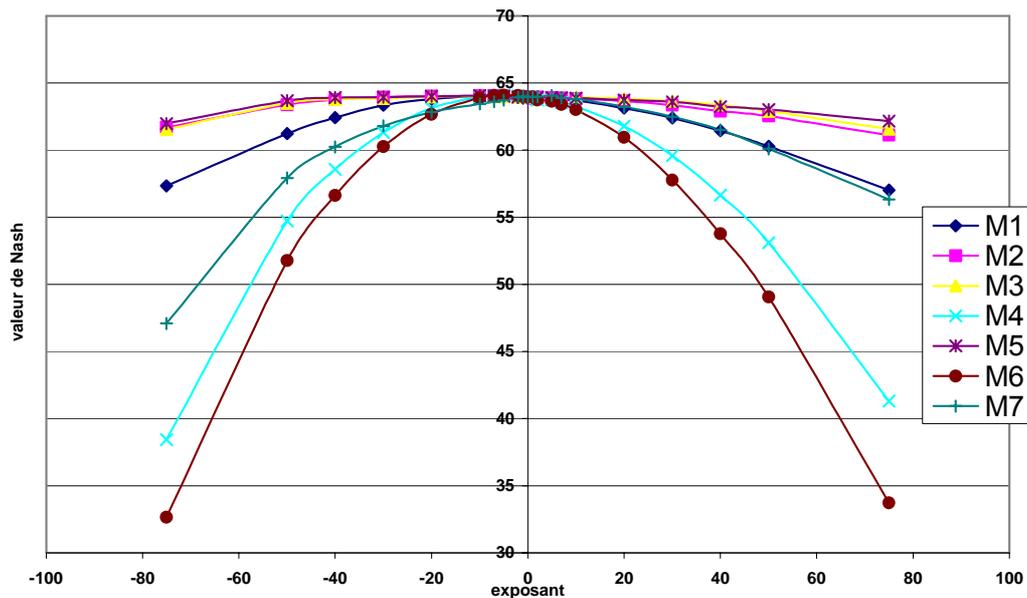


Figure 23 : Résultats moyens pour l'indice K1 de Nash avec Log Q

Nous ne présentons que le cas de l'indice K1, les autres indices produisant des résultats équivalents.

3.3.2.3 Existent-ils des améliorations sur certains bassins

Les critères moyens présentés précédemment ont mis en évidence qu'en moyenne, il était difficile d'obtenir un modèle prenant en compte de manière pertinente la pression atmosphérique. Cependant, les résultats moyens peuvent cacher des situations locales contrastées, avec éventuellement des améliorations sur quelques bassins. En effet, comme nous l'avons vu dans la partie descriptive, certains bassins présentent des corrélations intéressantes entre pression et débit. Des améliorations sont-elles obtenues sur ces bassins ?

Dans la Figure 24, nous pouvons voir la comparaison bassin par bassin des performances du modèle initial et du modèle prenant en compte la pression atmosphérique (nous avons sélectionné le modèle le plus convaincant). Nous pouvons voir sur ce graphique que des différences importantes peuvent apparaître. Cependant, les bassins présentant de fortes améliorations n'ont pas de caractéristiques communes particulières. De plus, il s'agit principalement de bassins américains pour lesquels nous ne disposons pas d'informations complémentaires sur la géologie.

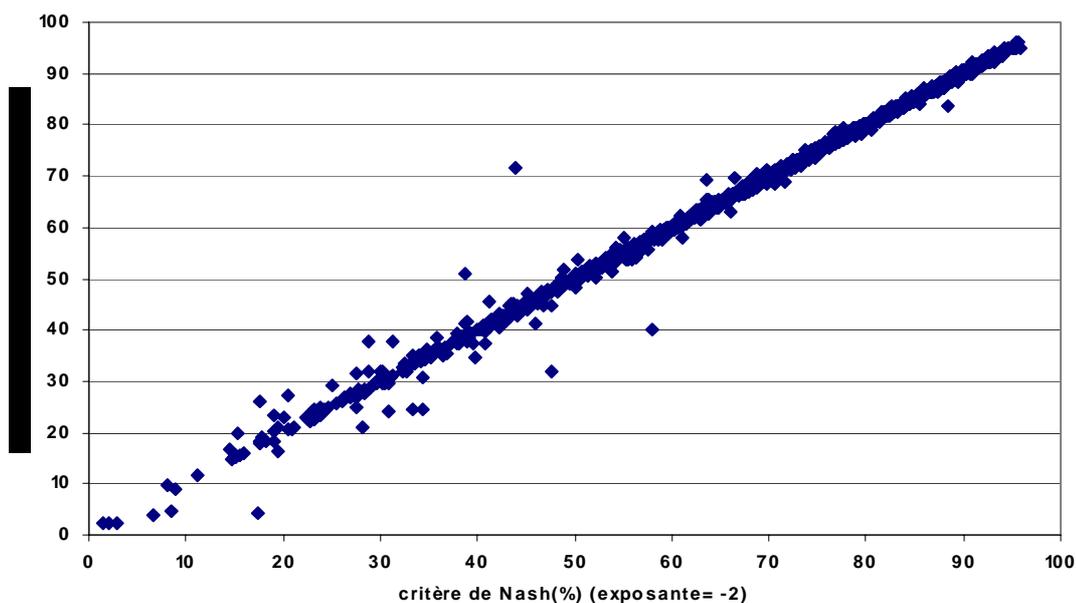


Figure 24: comparaison bassin par bassin (critère de Nash (Log Q))

3.3.3 Synthèse

Cette partie tentait d'apporter des éléments de réponse à la question suivante : *Peut-on bénéficier de la connaissance de la pression atmosphérique en modélisation pluie-débit ?*

Les résultats obtenus nous conduisent à répondre : *A priori, non, les performances moyennes du modèle initial et des variantes des modèles testées sont similaires.*

Cependant, il faut rappeler que les solutions testées étaient extrêmement simples (trop ?). Cette approche simple était justifiée dans un premier temps : puisque très peu de bibliographie était disponible sur l'intégration de données de pression atmosphérique dans les modèles pluie-débit, il était légitime de tester de façon brutale certaines modifications du modèle, afin d'avoir des idées sur des modifications ultérieures plus raffinées. Malheureusement, nous n'avons pas entrevu de solutions *a priori* viables.

Afin d'être sûr que la pression ne peut être utilisée dans les modèles pluie-débit comme GR4J, nous avons entrepris dans le prochain paragraphe de suivre une approche plus raffinée, que nous avons appelée approche conceptuelle.

3.4 Approche conceptuelle

3.4.1 Méthodologie

3.4.1.1 Présentation générale

L'approche conceptuelle est différente de l'approche empirique : dans l'approche empirique, nous testons un maximum de solutions possibles alors que dans l'approche conceptuelle, nous tentons de prendre en compte dans la structure du modèle deux « idées reçues » :

1. La pression atmosphérique peut influencer le niveau de la nappe et ainsi modifier le partage de la pluie entre eau ruisselée et eau infiltrée.
2. La pression atmosphérique peut favoriser la percolation.

Dans le modèle GR4J, ces deux hypothèses peuvent être testées en modifiant la structure du modèle eu deux points :

1. La partie de partage de la pluie nette allant dans le réservoir de production ;
2. La formulation de l'équation de percolation.

3.4.1.2 Indices de variations de pression

Comme pour l'approche empirique, nous avons utilisé des indices de variations de pression. Le premier est l'indice K1 précédemment utilisé et le deuxième est un indice plus raffiné intégrant un effet de mémoire de la pression atmosphérique :

$$K1 = \left(\frac{Pa_j}{Pa_{j-1}} \right)$$

$$K2 = \left(\frac{Pa}{Pa^*} \right)$$

Avec : $Pa^*(t) = \alpha Pa^*(t) + (1-\alpha)Pa(t)$

Et Pa = pression atmosphérique

3.4.1.3 Modifications testées

Les deux modifications apportées au modèle sont illustrées à la Figure 26. Ces modifications, permettent de prendre en compte l'indice de variation de pression de manière symétrique, lorsque $K < 1$ ou $K > 1$. De plus, on ne joue ici que sur le

partage de la pluie, on ne modifie pas le bilan en eau du modèle (pas de multiplication des lames d'eau comme dans l'approche empirique).

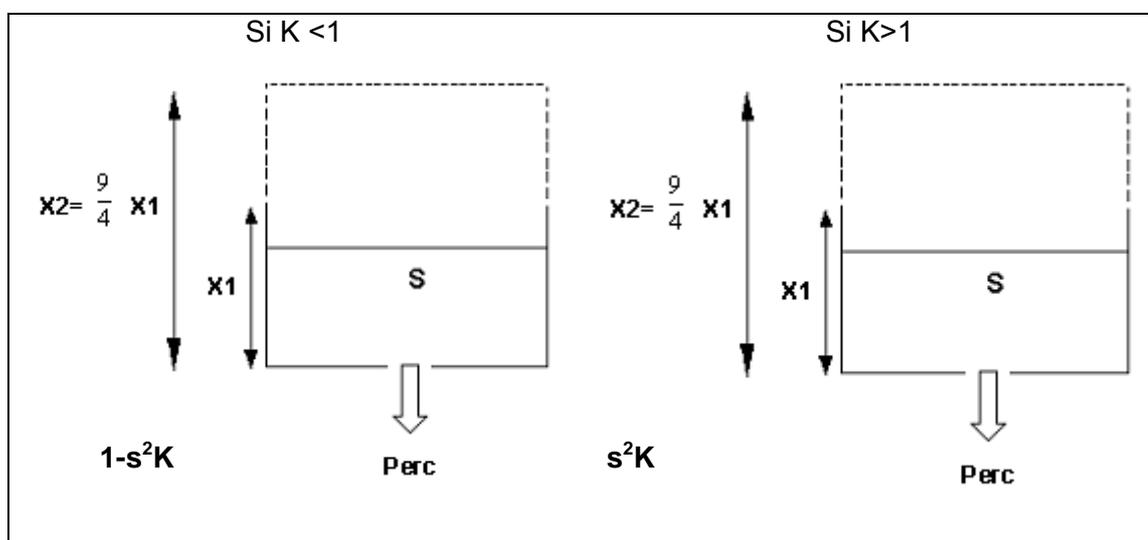
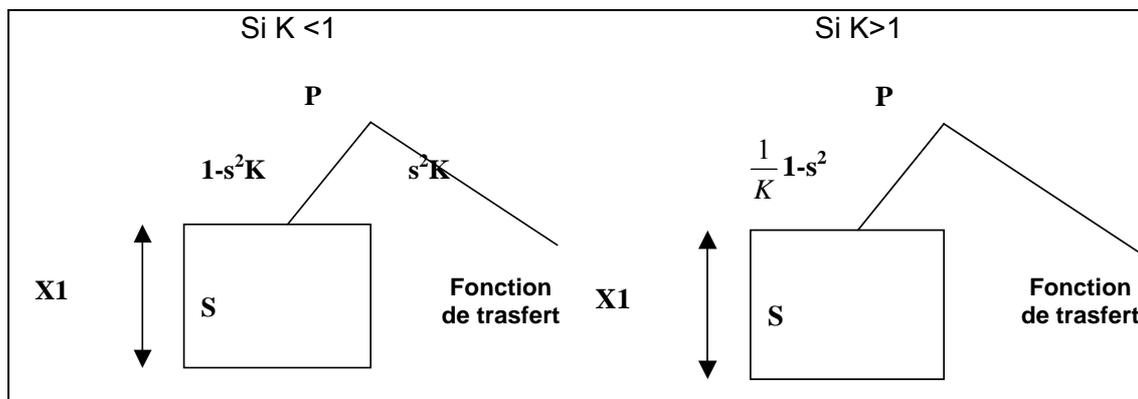


Figure 25 : Illustration de l'approche empirique : modification de la fonction de rendement du modèle GR4J

3.4.2 Présentation des résultats

Les résultats obtenus avec ces nouvelles formulations sont illustrés à la Figure 26. Nous avons représenté les résultats obtenus avec l'indice $K1$ (les résultats obtenus avec l'indice $K2$ sont indiqués en annexe) sur l'ensemble des 262 bassins versants de la base de données.

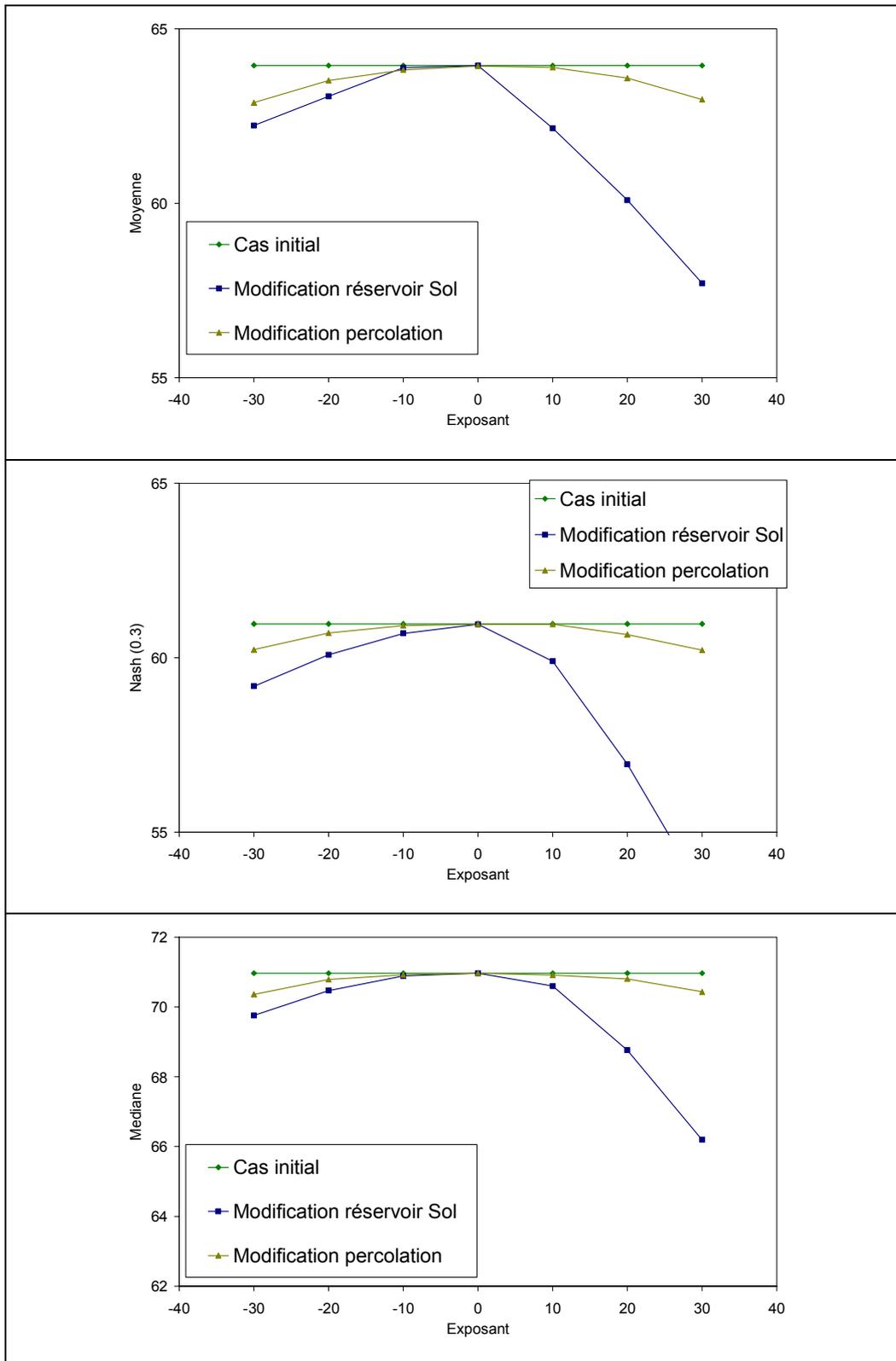


Figure 26 : Résultats de l'approche conceptuelle. Moyenne de Nash et quantiles 0.3 et 0.5 sur les 262 bassins versants.

Ces résultats sont similaires à ceux obtenus avec l'approche du type "boîte noire". Les performances du modèle modifié ne sont pas meilleures que celles obtenue avec le modèle initial.

3.5 Conclusion

L'approche conceptuelle a renforcé les résultats obtenus précédemment avec l'approche empirique : aucune des solutions testées n'améliore les performances du modèle initial.

Ainsi, il semble que la pression n'est pas une variable utile pour la modélisation pluie-débit conceptuelle. Deux hypothèses peuvent être avancées pour expliquer ces résultats :

1. La pression atmosphérique n'est pas une variable qui influence significativement les variations de débit et par conséquent, il est inutile de vouloir l'introduire comme donnée d'un modèle pluie-débit ;
2. Les solutions testées ne permettent pas de représenter de façon pertinente l'influence des variations de pression atmosphérique sur le débit.

Au vu du nombre de tests effectués, il semble que l'hypothèse 1 soit la plus vraisemblable.

Conclusion générale

Ce travail tentait d'apporter une réponse aux questions suivantes :

- Les variations de pression atmosphérique pourraient-elles influencer les débits des rivières ?
- Peut-on améliorer les performances d'un modèle pluie-débit en prenant en compte cette donnée supplémentaire ?

Même si les résultats obtenus ne permettent pas d'apporter des réponses catégoriques à ces deux questions, nous avons accumulé un certain nombre d'indices nous permettant d'avoir des idées sur les réponses à y apporter.

Dans un premier temps, nous avons resitué ce travail dans le cadre des études antérieures portant sur le rôle de la pression atmosphérique en hydrologie. Ces études semblent indiquer des corrélations significatives entre les variations de pressions atmosphériques et le niveau des nappes. En revanche, très peu d'études se sont attachées à déterminer le lien entre la pression atmosphérique et le débit des rivières.

Afin d'avoir une idée des liens entre pression et débit des rivières, nous avons suivi une approche descriptive sur un large échantillon de bassins versants. A notre connaissance, aucune étude n'a été effectuée à ce sujet et à cette échelle, ce qui peut paraître surprenant puisque les variations du niveau de la nappe dues aux variations de pression atmosphérique sont un phénomène assez reconnu.

L'étude a porté sur 262 bassins versants, localisés en France et aux États-Unis. Nous nous sommes appuyés sur l'analyse des corrélations entre pression et débit et, à titre de comparaison, entre débit et ETP et entre débit et pluie. Nous avons vu que le débit est le plus corrélé avec la pluie, mais aussi que les niveaux de corrélations ETP/débit et pression/débit étaient proches. Ainsi, la variable pression peut présenter un intérêt pour expliquer les variations de débits.

Afin d'infirmer ou de confirmer cette hypothèse, nous avons effectué dans la deuxième partie de nos recherches un travail de modélisation. La modélisation a été effectuée en suivant deux approches :

- Une approche empirique afin d'avoir une estimation grossière des gains pouvant être obtenus en prenant en compte les variations de pression et pour avoir une idée des modifications supplémentaires à apporter ;
- Une approche conceptuelle faisant intervenir des modifications plus probables.

Les deux approches ont débouché sur le même résultat : aucune des solutions testées n'améliorant les performances du modèle initial. Ainsi, il semble bien que la pression ne soit pas une variable utile pour la modélisation pluie-débit conceptuelle. Comme on l'a vu, deux hypothèses peuvent être avancées pour expliquer ces résultats :

1. La pression atmosphérique n'est pas une variable qui influence significativement les variations de débit et par conséquent, il est inutile de vouloir l'introduire comme donnée d'un modèle pluie-débit ;
2. Les solutions testées ne permettent pas de représenter de façon pertinente l'influence des variations de pression atmosphérique sur le débit.

Au vu du nombre de tests effectués et de l'approche descriptive effectuée, il semble que l'hypothèse 1 soit la plus vraisemblable.

5 Références

- [1] Bremond, R. (1965). contribution à l'interprétation des mesures de débit et de rabattement dans les nappes souterraines. GAUTHIER-VILLARS (Ed) Paris.
- [2] Callede, J. (1977). Oscillations journalières du débit des rivières en l'absence de précipitations. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 140 p.
- [3] Castany, G. (1963). Traité pratique des eaux souterraines. DUNOD (Ed), PARIS. 717 p.
- [4] Edijatno (1987). Amélioration des modèles simples de transformation pluie-débit au pas de temps journalier sur des petits bassins versants. Mémoire de DEA "Sciences et Techniques de l'Eau", Université Louis Pasteur (Strasbourg) / Cemagref (Antony).
- [5] Edijatno (1991). Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier. Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France, 242 p.
- [6] Edijatno, N. Nascimento, et al. (1999). GR3J: a daily watershed model with three free parameters. *Hydrological Sciences Journal* **44**(2): 263-278.
- [7] Köppen, W. (1931). Grundriss des Klimakunde.
- [8] Makhoul, Z. (1994). Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de Doctorat, Université Paris XI Orsay, 426 p.
- [9] Mathevet, T., C. Perrin, *et al.* (2005). Large samples of watersheds: a necessary condition to compare the efficiency of rainfall-runoff models? Soumis à *Water Resources Research* .
- [10] Michel, C. (1983). Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle conceptuel à un seul paramètre ? *La Houille Blanche*(1): 39-44.

[11] Michel, C. (1989). Hydrologie appliquée aux petits bassins versants ruraux. Antony, Cemagref.

[12] Nascimento, N. O. (1995). Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'action anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle du bassin versant. Thèse de Doctorat, CERGRENE/ENPC, Paris, 550 p.

[13] Nascimento, N. O. and C. Michel (1992). Some epistemological aspects of the development and use of hydrologic conceptual models. Proceedings of the 4th Junior Scientist Course "Assessment of Modelling Uncertainties and Measurement Error in Hydrology", St-Etienne (France).

[14] Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part I - a discussion of principles. Journal of Hydrology **10**: 282-290.

[15] Nejmeddine, M. (2004). Intégration de l'information de la distribution spatiale des pluies dans un modèle global GR4J. Rapport de DEA. Paris, Université Pierre et Marie CURIE (Paris VI)(Antony): 84.

[16] Oudin, L. (2004). Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global. Ph.D, Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Cemagref, Paris, France, 495 p.

[17] Perrin, C. (2000). Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale Terre, Univers, Environnement, INP / Cemagref Antony, Grenoble, France, 530 p.

[18] Perrin, C., C. Michel, *et al.* (2003). Analyse du rôle de l'information climatique pour la détermination de l'évapotranspiration dans la modélisation pluie-débit. Rapport final - Années 2001-2002. Antony, Cemagref, IRD, ENGREF: 49.

[19] Roche, M. A. (1970). Hydrologie des côtes du lac Tchad à NO, TCHINGAM et SORO (KANEM). 89-116.

[20] Thuinzaad (1954). influence of the atmospheric pressure on the head of artesian water and phreatic water. AISH II(Assemblée Générale de ROME): 32-37.

[22] Tison, L. J. (1951). Fluctuation d'une nappe aquifère étendue. AISH assemblée Générale de BRUXELLES: 195-201.

Annexe 1 : Formulation du modèle GR4J

Le modèle GR4J (modèle du Génie Rural à 4 paramètres, fonctionnant au pas de temps Journalier), comme tous les autres modèles du type GR, a été développé selon une approche empirique, basée sur le test et la validation de structures de modèles sur un grand nombre de bassins versants. Au pas de temps journalier, le point de départ de ce modèle est le modèle GR2 (Edijatno, 1991), qui est un modèle simple à deux paramètres. Ensuite ce modèle a été progressivement complexifié (Edijatno *et al.*, 1999), jusqu'à la version actuelle (Perrin *et al.*, 2003). Cette dernière version, qui est présentée par la suite, a été développée et testée sur un large échantillon de 429 bassins versants.

- Module de production :

La première opération est l'interception de la pluie brute par l'évapotranspiration potentielle, pour déterminer une pluie nette, P_n , et une évaporation nette, E_n :

Si $P \geq E$, alors $P_n = P - E$ et $E_n = 0$

La totalité de l'eau a été interceptée par l'évapotranspiration. L'évapotranspiration E_s prélevée dans le réservoir de production, est une fonction de son état de remplissage (S/X_1), qui permet une réduction d'un taux potentiel d'évaporation à un taux réel d'évaporation :

$$E_s = \frac{S \left(2 - \frac{S}{X_1} \right) \tanh \left(\frac{E_n}{X_1} \right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{X_1} \right) \tanh \left(\frac{E_n}{X_1} \right)}$$

Avec, S : niveau d'eau dans le réservoir sol, X_1 : capacité maximale du réservoir sol.

Si $P < E$, alors $P_n = 0$ et $E_n = E - P$

La pluie nette est séparée en deux parties, la première, P_s , alimente le réservoir sol, la seconde, $P_n - P_s$, alimente l'écoulement. La répartition entre ces deux voies se fait en fonction du taux de remplissage du réservoir de production. Si ce taux est nul, toute l'eau sert à remplir le réservoir de production et il n'y a pas de

contribution à l'écoulement. Au contraire, si le taux de remplissage est maximal, toute l'eau de pluie alimente l'écoulement. L'alimentation du réservoir de production est :

$$P_s = \frac{X_1 \left(1 - \left(\frac{S}{X_1} \right)^2 \right) \tanh \left(\frac{P_n}{X_1} \right)}{1 + \frac{P_n}{X_1} \left(2 - \frac{S}{X_1} \right)}$$

Le contenu du réservoir de production est mis à jour par :

$$S = S - E_s + P_s$$

Ensuite, une percolation, Perc, issue du réservoir de production est calculée :

$$Perc = S \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{4 S}{9 X_1} \right)^4 \right]^{\frac{-1}{4}} \right\}$$

Le contenu du réservoir de production est mis à jour par :

$$S = S - Perc$$

Finalement, la quantité d'eau P_r qui atteint la partie routage du modèle est donnée par :

$$P_r = Perc + (P_n - P_s)$$

- Module de routage :

La quantité d'eau P_r , transférée au module de routage, est divisée en deux composantes d'écoulement. Une composante rapide (P_1), 10 % de P_r , qui est routée par un hydrogramme unitaire HU2 et une composante lente (P_9), 90 % de P_r , qui est routée par un hydrogramme unitaire HU1. Les deux hydrogrammes, HU1 et HU2, dépendent d'un même paramètre X_4 , qui représente le temps de base de HU1, exprimé en jours.

Les ordonnées des hydrogrammes sont calculées à partir des courbes en S, notées SH1 et SH2. SH1 est définie en fonction du temps par :

Pour $t \leq 0$,

$$SH1(t) = 0$$

Pour $0 < t < X_4$,

$$SH1(t) = \left(\frac{t}{X_4} \right)^{\frac{5}{2}}$$

Pour $t > X_4$

$$SH1(t) = 1$$

SH2 est définie en fonction du temps par :

Pour $t \leq 0$,

$$SH2(t) = 0$$

Pour $0 < t < X_4$,

$$SH2(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{t}{X_4} \right)^{\frac{5}{2}}$$

Pour $X_4 < t < 2.X_4$,

$$SH2(t) = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{t}{X_4} \right)^{\frac{5}{2}}$$

Pour $t > 2.X_4$,

$$SH2(t) = 1$$

Finalement, les ordonnées de HU1 et HU2 sont calculées par :

$$HU1(j) = SH1(j) - SH1(j-1)$$

$$HU2(j) = SH2(j) - SH2(j-1)$$

où, j est un entier.

HU1 transforme P_9 pour donner Q_9 et HU2 transforme P_1 pour donner Q_1 .

Ensuite, un échange souterrain est calculé par :

$$F = X_2 \cdot \left(\frac{R}{X_3} \right)^{\frac{7}{2}}$$

avec, R : niveau d'eau dans le réservoir de routage, X_3 : la capacité à un jour du réservoir, X_2 : le coefficient d'échange en eau, positif en cas d'apports au système et négatif en cas de sorties du système ou nul.

Ensuite, le niveau dans le réservoir de routage est mis à jour, en ajoutant la sortie Q_9 de HU1 et F :

$$R = \max(0; R + Q_9 + F)$$

Composante lente :

Ensuite, le réservoir de routage se vidange et donne une sortie Q_r :

$$Q_r = R \cdot \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R}{X_3} \right)^4 \right]^{\frac{-1}{4}} \right\}$$

Le niveau du réservoir devient alors :

$$R = R - Q_r$$

Composante rapide :

La sortie Q_1 de HU2 est soumise aux mêmes échanges souterrains pour donner la composante d'écoulement Q_d :

$$Q_d = \max(0; Q_1 + F)$$

Finalement, le débit total est donné par :

$$Q = Q_r + Q_d$$

Annexe 2 : Approche empirique

Les résultats du premier test sur K 1 sont présentés dans le tableau suivant :

Exposant	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
-75.0	57.3	61.7	61.5	38.4	62.0	32.7	47.1
-50.0	61.2	63.4	63.5	54.7	63.7	51.8	57.9
-40.0	62.4	63.7	63.8	58.6	63.9	56.6	60.2
-30.0	63.3	63.9	63.9	61.3	63.9	60.3	61.8
-20.0	63.8	64.0	64.0	63.1	64.0	62.7	62.8
-10.0	64.1	64.0	64.0	64.0	64.0	63.9	63.4
-7.0	64.1	64.1	64.0	64.0	64.0	64.1	63.6
-5.0	64.0	64.0	64.0	64.1	64.0	64.1	63.7
-2.0	64.0	64.0	64.0	64.0	64.0	64.1	63.9
-1.0	63.9	64.0	64.0	64.0	63.9	64.0	64.0
0.0	63.9	63.9	63.9	63.9	63.9	63.9	63.9
1.0	64.0	63.8	63.9	63.9	63.9	63.9	64.0
2.0	63.9	63.9	64.0	63.7	64.0	63.7	64.0
5.0	63.9	63.9	63.8	63.7	63.9	63.6	64.1
7.0	63.8	63.9	63.8	63.5	63.9	63.4	63.9
10.0	63.7	63.8	63.9	63.2	63.9	63.0	63.8
20.0	63.1	63.7	63.8	61.8	63.7	61.0	63.2
30.0	62.4	63.3	63.7	59.6	63.6	57.8	62.5
40.0	61.4	62.9	63.4	56.6	63.2	53.8	61.5
50.0	60.3	62.5	62.9	53.1	63.0	49.1	60.1
75.0	57.0	61.1	61.6	41.3	62.2	33.7	56.3

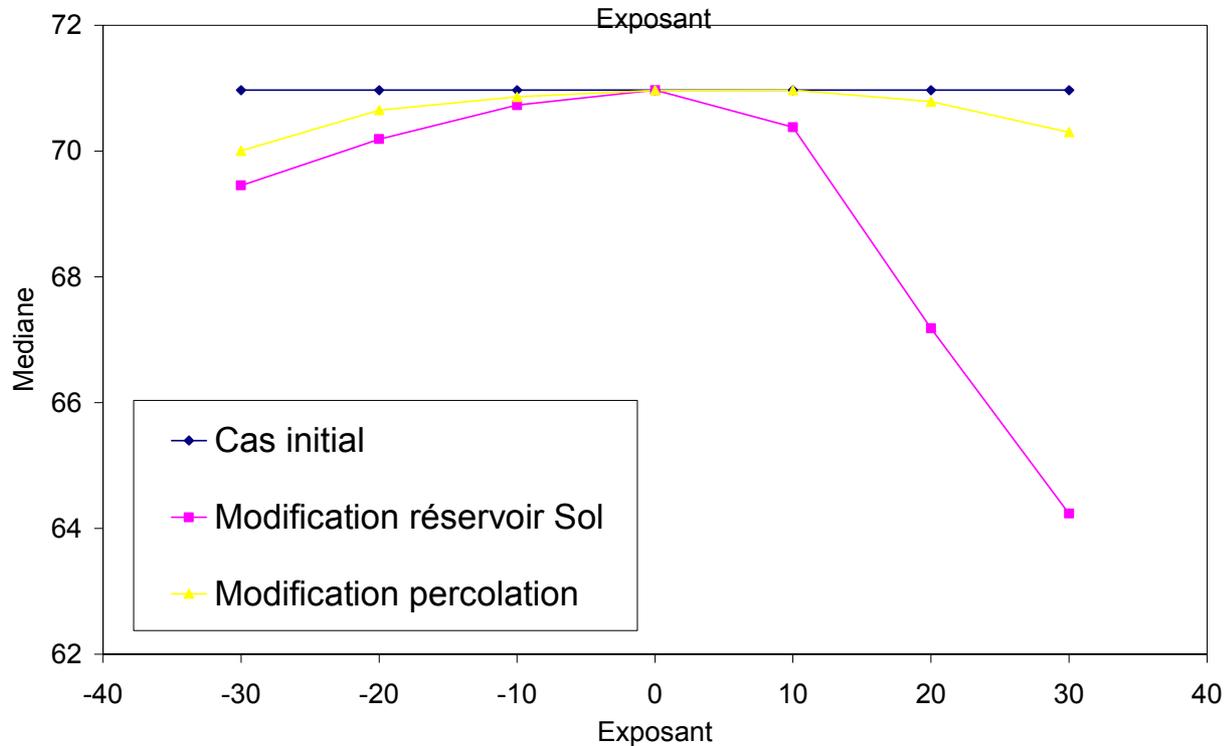
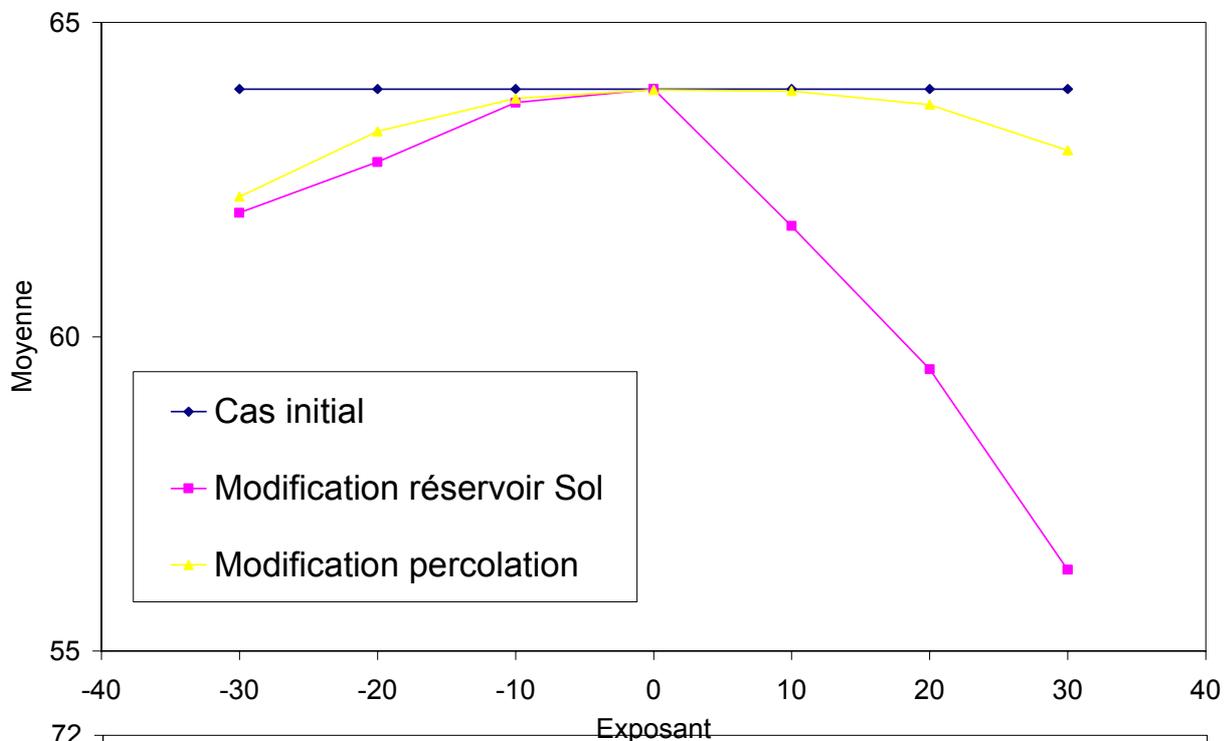
Tableau 3: moyenne du critère de NASH pour K1 et pour l'ensemble des modèles

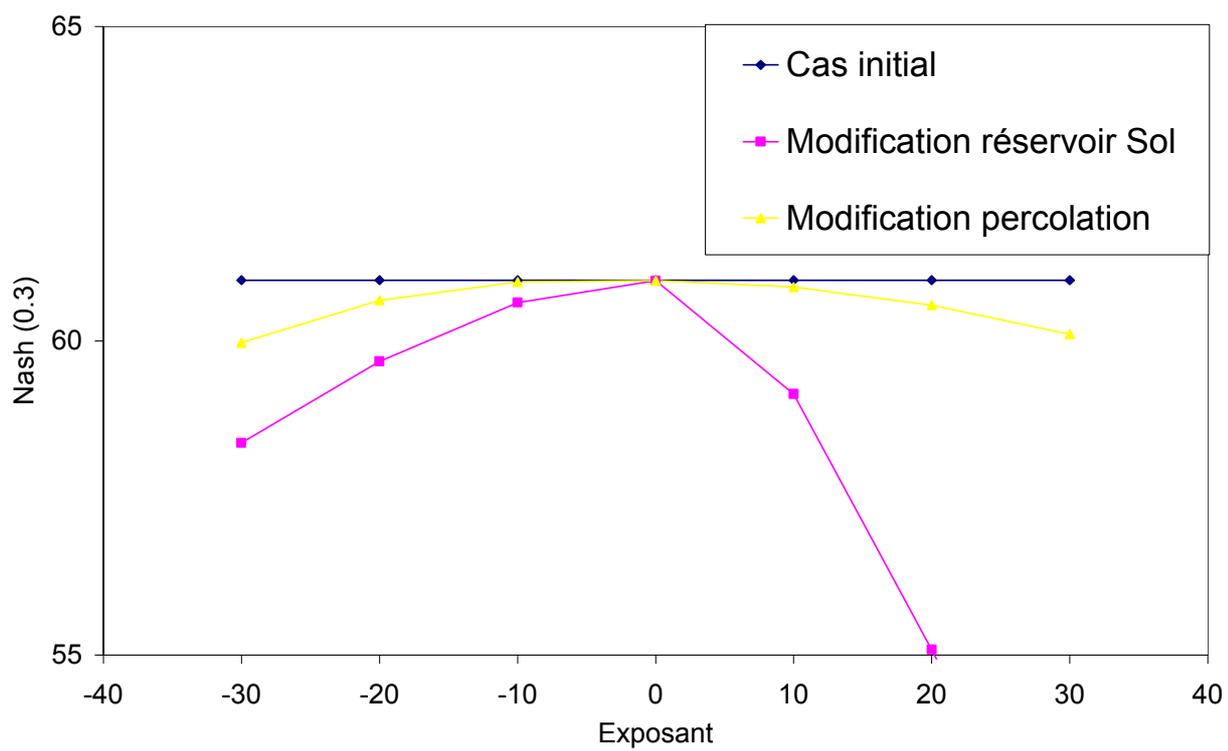
Serie 2 Pj/Pj-1

Alpha	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
-75	60.48	62.34	62.71	51.656	62.074	47.655	57.965
-50	62.48	63.81	63.718	58.982	63.661	57.088	61.412
-40	62.976	63.97	63.91	60.935	63.773	59.75	62.253
-30	63.375	63.968	63.944	62.278	63.839	61.553	63.006
-20	63.691	63.985	63.853	63.232	63.89	62.874	63.386
-10	63.83	63.85	63.932	63.81	63.952	63.668	63.705
-7	63.825	63.986	63.952	63.881	63.955	63.73	63.866
-5	63.981	63.965	63.963	63.945	63.943	63.934	63.923
-2	63.967	63.959	63.947	63.945	63.94	63.926	63.969
-1	63.963	63.95	63.948	63.951	63.945	63.955	63.957
0	63.949	63.949	63.949	63.949	63.949	63.949	63.949
1	63.967	63.945	63.947	63.945	63.952	63.952	63.94
2	63.953	63.95	63.955	63.948	63.95	63.943	63.965
5	64.017	63.984	63.955	63.931	63.961	63.92	63.886
7	64.024	63.828	63.962	63.88	63.94	63.746	63.773
10	64.006	63.821	63.993	63.692	63.964	63.745	63.738
20	63.811	63.934	63.893	63.326	63.926	62.965	63.395
30	63.582	63.883	64.01	62.408	63.865	61.639	63.011
40	63.1	63.87	64.013	61.076	63.786	59.872	62.701
50	62.906	63.778	63.893	59.338	63.649	57.426	62.304
75	61.498	62.792	62.991	51.964	62.917	48.274	59.573

Tableau 4: moyenne du critère de NASH pour K2 et pour l'ensemble des modèles

Annexe 3: Approche conceptuelle avec le K2





Résumé court - Abstract

Cette recherche tente de déterminer si les variations de pression atmosphérique peuvent influencer les débits des rivières, dans le but d'intégrer éventuellement cette nouvelle donnée au sein d'un modèle pluie-débit.

Tout d'abord, une étude statistique descriptive a montré que les débits sont en général peu corrélés avec les variations de pression, en comparaison avec la pluie. Cependant, pour certains bassins, les corrélations Pression/ débit sont équivalentes aux variations ETP/ débit.

Ensuite, nous avons modifié la structure d'un modèle pluie-débit simple afin qu'il prenne en compte les variations de pression atmosphérique. Ces modifications ont été testées sur un grand nombre de bassins et n'ont pas permis d'améliorer les performances du modèle pluie-débit GR4J.

In this study, we tried to know if the variations of the atmospheric pressure can influence the flows of the rivers in order to improve the performances of a rainfall-runoff model.

First, a statistical analysis indicated that streamflows are, in general, not correlated to the variations of atmospheric pressure and that in fact the variations of precipitation are dominating. However, on some catchments, the correlations Streamflow/Pressure are equivalent to the correlations Potential evaporation/Streamflow.

Then, we modified the structure of a simple rainfall-runoff model, using factors that take account of the variations of pressure. We tested these modifications on a great number of watersheds and found no improvement of the performance of the model when taking into account the atmospheric pressure.