INFLUENCE DE LA PHYSIOGRAPHIE D'UN BASSIN VERSANT SUR LES PARAMÈTRES DE MODÉLISATION HYDROLOGIQUE GLOBALE : APPLICATION À LA BRETAGNE ET À LA MOSELLE

D. THIERRY[1]

RÉSUMÉ

L'évaluation des ressources en eaux superficielles à l'échelon régional ou tout simplement en des bassins versants non jaugés ne peut être faite par simple interpolation géographique. En effet, la physiographie du bassin (morphologie, couvert végétal, géologie) a une influence marquée sur les écoulements. Il est parfois possible de calculer directement des caractéristiques de l'écoulement (débits d'étiage par exemple) par régression linéaire à partir de la physiographie du bassin. Les séries d'observations d'écoulement étant généralement courtes, (surtout dans les pays industrialisés) leur analyse directe ne permet cependant pas d'en évaluer la variabilité temporelle. Pour tenir compte de l'information pluvioclimatique généralement disponible sur de longues périodes et beaucoup plus facile à interpoler, on a utilisé un modèle hydrologique global dépendant de quatre ou cinq paramètres globaux. Une étude statistique par régression multiple appliquée à deux régions (quarante deux petits bassins de Bretagne et trente huit bassins et sous-bassins de la Moselle) a permis de mettre en évidence des relations fiables et robustes entre certains de ces paramètres et des caractéristiques physiographiques des bassins. Il est ainsi possible (en prédéterminant, par ces relations, les paramètres de bassins non jaugés) d'y calculer les débits à l'exutoire pendant les longues périodes d'observations pluviométriques et d'apprécier ainsi la ressource à l'échelon régional en tenant compte de sa variabilité temporelle.

[1]B.R.G.M 4S/EAU, BP 6009, 45060 Orléans, Cedex 2 France

INTRODUCTION

Pour évaluer les débits d'un bassin versant hydrologique non jaugé, ou bien pour évaluer les ressources en eau à l'échelle régionale, trois approches sont possibles :

— soit interpoler géographiquement les données ponctuelles obtenues dans quelques bassins jaugés : il est bien évident que cette méthode, purement géométrique, a peu de chance de donner des résultats utilisables, puisque la physiographie du bassin (morphologie, couvert végétal, géologie) a une influence marquée sur les écoulements ;

— soit calculer des caractéristiques de l'écoulement (débits caractéristiques, débits d'étiage) par régression à partir des caractéristiques physiographiques du bassin. Cette méthode peut donner des résultats intéressants mais, d'une part, il est rare que les points d'observations soient synchrones (ce qui peut être très gênant si le climat est irrégulier), d'autre part, on n'obtient par cette méthode que des caractéristiques de l'écoulement, mais pas des séries complètes pouvant être utilisées pour analyser les risques de défaillance d'un ouvrage ;

— soit ajuster un modèle pluie-débit sur chacun des bassins observés et établir des relations statistiques entre les paramètres de modélisation et les caractéristiques physiographiques du bassin versant. Cette troisième approche semble (au moins en théorie) la plus fondée, puisqu'elle s'affranchit de la variabilité des périodes d'ajustement du modèle, les paramètres de modélisation étant indépendants de cette période. D'autre part, elle permet, par utilisation d'une série pluviométrique, de générer une séquence continue de débits généralement de longue durée. C'est cette approche qui a été retenue pour la banque de données Prophète (Filippi *et al.*, 1986a et b).

Cet article présente deux exemples d'applications de cette approche en utilisant le modèle hydrologique global pluie-débit Gardénia (Roche et Thiery, 1984 ; Thiery, 1988). C'est également l'approche qui était visée par Kabouya (1990), et c'est celle qui est sous-jacente dans la procédure de calage du modèle spatialisé décrit par Girard *et al.* (1972 et 1979).

Les régions modélisées sont respectivement quarante deux bassins de Bretagne et trente huit bassins de la Moselle (Thiery, 1985).

MODÉLISATION DES BASSINS BRETONS

Pour chacun des quarante deux bassins, on a calé automatiquement séparément le modèle Gardénia au pas de temps mensuel ; on a ainsi obtenu quarante deux jeux des cinq paramètres suivants :

— coefficient correcteur d'ETP (%) : CETP,
— capacité d'évapotranspiration (mm) : RUMAX,
— hauteur d'équi-ruissellement (mm) : RUIPER,
— temps de demi-montée (mois) : THG,
— temps de demi-tarissement (mois) : TG.

La signification exacte des paramètres est donnée dans le rapport de ROCHE et THIERY (1984). Après un premier calage, il est apparu que les temps de tarissement TG étaient souvent inférieurs au temps de montée THG. Pour augmenter la stabilité des paramètres, on a refait un calage automatique des quarante deux bassins en imposant comme contrainte TG > THG. Ce passage est noté avec l'indice 1. On a ensuite fait un autre calage en réduisant le nombre des paramètres à trois seulement, en fixant TG à deux mois et THG à un mois, ce qui correspond aux valeurs médianes obtenues pour le calage précédent. Ce calage avec trois paramètres a reçu l'indice 2.

Le tableau 1 présente les caractéristiques des deux jeux de paramètres. Il montre en particulier que les paramètres de la fonction transfert (THG, TG et RUIPER) doivent subir une transformation logarithmique pour avoir une répartition gausienne (moyenne identique à médiane) et que les deux paramètres de production (CETP et RUMAX) sont très liés d'un jeu à l'autre, ce qui montre la stabilité du modèle.

Tableau 1
Caractéristiques des deux jeux de paramètres hydrologiques de modélisation des quarante deux bassins versants bretons

	CETP (%)	RUMAX (mm)	RUIPER (mm)	THG (mois)	TG (mois)
Moyenne jeu 1	5	122	548	0,81	1,55
Moyenne jeu 2	8	116	156	/	/
Ecar-type jeu 1	15	48	413	0,68	1,41
Moyenne géométrique jeu 1	/	/	353	0,58	1,27
Médiane jeu 1	10	110	350	0,60	1,20
Corrélation entre jeu 1 et jeu 2	0,76	0,81	0,33	/	/

L'analyse de la matrice de corrélation des paramètres hydrologiques de modélisation montre qu'il n'y a pas de relation entre les paramètres de la fonction production et les paramètres de la fonction transfert. On remarque cependant, pour le jeu 1, un coefficient de corrélation de –0,41 entre RUIPER et THG, ce qui est logique puisque c'est surtout le produit de ces deux paramètres qui est important ; donc, si l'un des deux est diminué, l'autre a tendance à augmenter. On note aussi un coefficient de corrélation de 0,54 entre TG (jeu 1) et RUIPER (jeu 2), ce qui est normal puisque TG étant bloqué pour le jeu 2, c'est la hauteur d'équi-ruissellement qui permet d'avoir des tarissements plus ou moins lents et joue un peu le rôle du coefficient de tarissement.

Les variables explicatives disponibles

On dispose d'un fichier physiographique relatif aux quarante deux bassins. Ce fichier physiographique a été déterminé par analyse des cartes géographiques et géologiques disponibles. Les paramètres obtenus sont les suivants :

- SURF = superficie du bassin versant en km² ;
- ALLON = allongement = rapport du carré de la plus grande longueur du bassin à sa superficie = (Lmax)²/SURF ;
- ALTI = altitude moyenne = (H90 - H10)/2 (en m). H10, H90 = altitudes à 10 % et 90 % de la longueur du plus long cours d'eau (LCP) ;
- PENTE = pente moyenne du plus long cours d'eau en ‰ (H90 - H10)/(0,8 LCP) ;
- LCP = longueur du cours d'eau principal (km) ;
- LONG = longueur du chevelu hydrographique (km) ;
- NOMBR = « nombre de cours d'eau » dans le bassin versant ;
- DD = densité de drainage en km/km² ;
- NCK = « nombre de cours d'eau » par km ;
- SCHIS = pourcentage de superficie en affleurement de schiste (en %) ;
- GRANI = pourcentage de superficie en affleurement de granite (en %).

Analyse préliminaire des paramètres explicatifs

Pour mettre en évidence les transformations de variables et pour déterminer les éventuelles redondances, on a réalisé une analyse préliminaire sur les paramètres explicatifs (voir tableau 2).

Tableau 2
Analyse préliminaire des paramètres explicatifs potentiels

	Moyenne	Écart-type	Asymétrie	Moyenne géométrique	Asymétrie de la transformée logarithmique
SURF	154,00	174,00	2,00	87,00	-0,20
ALLON	3,00	0,81	0,60		
ALTI	92,00	40,00	1,30		
PENTE	5,00	3,20	1,20	4,10	-0,10
LCP	24,00	17,00	1,50	19,00	-0,20
LONG	114,00	118,00	1,90	68,00	-0,40
NOMBR	37,00	38,00	1,90	21,00	-0,40
DD	0,81	0,22	0,70	0,78	0,10
NCK	0,28	0,15	1,40		
SCHIS	41,00	37,00	0,30		
GRANI	41,00	37,00	0,30		
SCH+GR	82,00				

Parmi ces paramètres physiographiques, il est évident que les paramètres LCP, LONG et NOMBR sont liés à la taille du bassin, LCP étant plus spécialement lié à une dimension du bassin, donc à la racine carrée de la superficie.

	SURF		$\sqrt{SURF}$	
	Corrélation	Facteur	Corrélation	Facteur
LCP	0,96	0,092	0,96	2,63
LONG	0,98	0,633	0,96	18,50
NOMBR	0,90	0,200	0,87	5,50

On note bien une très forte relation avec la surface :

— la longueur du cours d'eau principal est de 2,6 fois la dimension (racine carrée de la surface) du bassin ;

— la longueur totale du chevelu est de 0,66 km/km² (à comparer à la médiane de la densité de drainage de 0,78 km/km²), soit une surface drainée de 1,5 km²/km de cours d'eau ;

— le nombre de cours d'eau est de 0,20 par km² (à comparer à NCK dont la médiane est de 0,28 par km²), soit une surface drainée de 5 km² par « cours d'eau » ;

— chaque cours d'eau a une longueur moyenne de 2,94 km avec un cœfficient de corrélation de 0,96 entre LONG et NOMBR ;

— il en résulte que les deux indices de drainages DD et NCK sont très liés (coefficient de corrélation 0,86).

Les paramètres géologiques sont très liés car schistes + granites représentent 82 % de la superficie d'un bassin en moyenne. Le coefficient de corrélation entre ces variables est de –0,80. La matrice de corrélation entre les paramètres physiographiques est donnée dans le tableau 3.

Tableau 3

Matrice de corrélation entre les paramètres physiographiques

	LogSURF	ALLON	ALTI	LogPENTE	LogLCP	DD
ALLON	0,08					
ALTI	-0,05	-0,33				
LogPENTE	-0,51	-0,13	0,39			
LogLCP	(0,88)	0,34	-0,01	-0,54		
DD	-0,25	-0,04	0,07	0,16	-0,17	
GRANI	-0,26	0,01	0,07	0,17	-0,23	0,62

Les paramètres étant à peu près gaussiens (comme le montre leur coefficient d'asymétrie) et l'échantillon étant constitué de quarante deux observations, seuls les coefficients de corrélation dont la valeur absolue est supérieure à 0,29 sont significativement différents de zéro au seuil de 95 %.

Parmi ces coefficients, on note :

— r (SURF, PENTE) = -0,51. Les bassins les plus grands sont les moins « pentus » ; ceci tient peut-être en partie à l'échelle de la carte utilisée qui est moins précise pour les grands bassins. On observe la même relation r (LCP, PENTE) = -0,54 car LCP et SURF sont très liés ;

— r (GRANI, DD) = 0,62. Les bassins ayant une forte proportion d'affleurements granitiques ont une densité de drainage beaucoup plus élevée ;

— r (ALTI, PENTE) = 0,39. Les bassins d'altitude plus élevée ont généralement un indice de pente plus grand, ce qui est assez logique.

RELATIONS ENTRE LES PARAMÈTRES HYDROLOGIQUES DE MODÉLISATION ET LES PARAMÈTRES PHYSIOGRAPHIQUES

Le tableau 4 présente la matrice de corrélation entre les paramètres hydrologiques (paramètres à expliquer) et les paramètres physiographiques (paramètres explicatifs). Ce tableau indique également combien de fois une variable est explicative et combien de fois un paramètre est expliqué.

Tableau 4
Matrice de corrélation entre paramètres de modélisation et paramètres physiographiques

Paramètres de modélisation		Paramètres physiographiques (explicatifs)						Nombre de fois expliqué à	
		Log SURF	ALLON	ALTI	Log PENTE	DD	GRANI	95 %.	99 %.
CETP	1	0,16	0,16	-0,30	-0,06	-0,04	-0,04	1	/
	2	0,24	0,04	-0,14	-0,06	-0,20	0,11	/	/
RUMAX	1	-0,15	0,12	-0,38	-0,07	0,10	0,17	1	1
	2	-0,13	0,27	-0,54	-0,14	-0,10	-0,01	1	1
Log RUIPER	1	-0,17	-0,24	-0,41	0,37	0,09	0,23	2	1
	2	-0,19	-0,04	0,11	0,30	0,54	0,69	3	2
THG		-0,04	0,32	-0,35	-0,02	0,01	-0,08	2	/
TG		0,02	0,00	-0,04	-0,03	0,34	0,44	2	1
Nombre de fois explicatifs	95 %.	0	1	5	2	2	2		
	99 %.	/	/	3	/	1	2		

Relations dont on peut trouver une explication logique

— **ETP** : diminuée avec l'altitude (pour le jeu 1), la température étant plus basse en altitude. Les stations climatiques sont par contre plutôt en plaine d'où un écart. La relation est peu nette. Diminution de 6 % de l'ETP pour une augmentation d'altitude de 50 m.

— **Réserve utile RUMAX** : diminuée avec l'altitude (très net pour le jeu 2). Peut être due à une végétation différente avec peu de sols. Diminution de la réserve de 30 mm pour une altitude augmentée de 50 m.

— **Équi-ruissellement RUIPER jeu 2** : très nettement augmenté avec la proportion de granite (et la densité de drainage, ce qui est identique). Plus il y a de granite, moins il y a d'écoulement superficiel rapide, même à la suite de précipitations abondantes : RUIPER augmente de 40 % pour une augmentation de 20 % de la superficie des granites. En fait, les temps de tarissement TG étant bloqués à deux mois, c'est la seule manière de permettre des écoulements plus lents.

— **Temps de demi-montée THG** : augmente avec l'allongement du bassin : c'est logique, le temps de montée est plutôt long ; THG diminue avec l'altitude : sans explication apparente.

— **Temps de demi-tarissement TG** : augmente avec le pourcentage de granite (et la densité de drainage qui lui est liée). Il augmente de 15 % pour une augmentation de 15 % de proportion de granite. Il est classique d'observer des tarissements plus lents dans les formations granitiques.

Relations dont on ne trouve pas d'explication simple

— **Équi-ruissellement RUIPER** :
  — augmente avec la pente, c'est-à-dire : plus de pente, moins de ruissellement ;
  — diminue avec l'altitude pour le jeu 2, c'est-à-dire : plus haute altitude..., plus de ruissellement.

Bilan

Le tableau 4 montre que les paramètres les plus explicatifs sont respectivement : l'altitude moyenne (5 fois), le pourcentage de granite (2 fois), la densité de drainage (2 fois) et la pente (2 fois). Les paramètres hydrologiques les mieux expliqués sont : la hauteur d'équi-ruissellement, les temps de transfert (et, également à un degré moindre, la capacité d'évapotranspiration).

ÉQUATIONS DE PRÉVISION

Des régressions multivariables ont été calculées pour tous les paramètres des modèles. En fait, pour chaque paramètre, seule une variable explicative a pu être retenue au maximum (les autres n'ayant pas d'influence significative). Les régressions sont donc du type : $Y = AX + b$ et sont caractérisées par leur coefficient de corrélation R et l'écart-type de l'erreur noté Se. Les calculs ont été réalisés sur les quarante deux observations (notation T). Dans un but de vérification, on a également calculé les régressions après suppression de douze observations sur quarante deux à titre de contrôle. Trois essais ont été réalisés en supprimant les douze observations :

— du Début (1 à 12) : notation D,
— du Milieu (13 à 24) : notation M,
— de la Fin (25 à 36) : notation F.

Les coefficients de régression et les coefficients de corrélation ont été comparés (voir tableau 5).

Tableau 5
Équations de prévision

		a	b	R sans biais	Se sans biais
À expliquer : RUMAX (jeu 2) Var. explicative : ALTI	T	-0,612	172	0,52	39
	D	-0,825	196	0,55	42
	M	-0,659	174	0,54	39
	F	-0,461	159	0,48	34
À expliquer : log RUIPER (jeu 2) Var. explicative : GRANI	T	0,00741	1,721	0,68	0,290
	D	0,00723	1,778	0,64	0,289
	M	0,00837	1,656	0,76	0,268
	F	0,00658	1,735	0,64	0,296
À expliquer : DD Var. explicative : GRANI	T	0,00368	0,658	0,60	0,176
	D	0,00383	0,648	0,60	0,171
	M	0,00453	0,656	0,70	0,175
	F	0,00281	0,680	0,52	0,167

T = 42 bassins
D = suppressions des 12 bassins du Début : 1 à 12
M = suppressions des 12 bassins du Milieu : 13 à 24
F = suppressions des 12 bassins de la Fin : 25 à 36.

On a ainsi retenu deux régressions expliquant respectivement les paramètres RUMAX (jeu 2) et RUIPER (jeu 2) qui sont les seules à être stables. On a également mis en évidence que la relation entre la densité de drainage (DD) et le pourcentage de surface granitique (GRANI) est très stable.

Modélisation de trente huit bassins de la Moselle

Deux calages ont été réalisés successivement, au pas de temps mensuel : le premier (jeu 1) en optimisant un coefficient global de correction de pluie CORPLU pour tenir compte de l'effet d'altitude et de représentativité des postes pluviométriques et un second calage (jeu 2) sans corrections. Les constantes de temps de demi-montée THG et de tarissement (TG) ont été imposées pour tous les bassins respectivement à 1,5 mois et 3 mois. Il reste donc trois paramètres à identifier (tableau 6) :

— coefficient correcteur global de pluie (%) : CORPLU (jeu 1 seulement) ;
— capacité d'évapotranspiration (réserve utile) (mm) : RUMAX ;
— hauteur d'équi-ruissellement (mm) : RUIPER.

Tableau 6
Paramètres hydrologiques à expliquer

	CORPLU (%)	RUMAX (mm)	Racine RUIPER
Moyenne jeu 1	-12,6	46	8,2
Moyenne jeu 2	/	122	7,25
Asymétrie jeu 1	1,1	0,5	1
Asymétrie jeu 2	/	0,3	0,9
Corrélation (jeu 1, jeu 2)	/	0,08	0,97

Corrélation remarquable : (CORPLU, RUMAX jeu 2) = -0,72

Paramètres physiographiques

Le fichier physiographique utilisé a été extrait du fichier mis au point par l'Orstom et l'Agence Financière de Bassin Rhin-Meuse, et nous a été communiqué gracieusement. Il est basé sur l'analyse fine des données dans un carroyage de 5 km de côté. Le tableau 7 donne la description succincte des

variables ainsi que leurs caractéristiques statistiques. Ce tableau montre également les liaisons linéaires très marquées entre les différentes variables, en particulier : altitude, pente, cristallin, conifères.

Tableau 7
Bassins de la Moselle : caractéristiques du fichier physiographique

Variable	Abréviation	Moyenne	Écart-type	Unité
Altitude	ALTIT	347	168	m
Pente	PENTE	4,53	3,86	%.
Feuillus	FEUIL	25,3	19	%.
Conifères	CONIF	10,8	20,6	%.
Friche	FRICH	1,9	3,1	%.
Prairies	PRAIR	35	14,7	%.
Cultures	CULTU	21,2	13,3	%.
Forêts	FORET	39,4	22,5	%.
Champs	CHAMP	56,2	22,7	%.
Grès	GRES	24,8	32	%.
Altérations	ALTER	15,4	29,6	%.
Karst	KARST	14,2	30	%.
Marnes	MARNE	32,5	36,6	%.
Cristallin	CRIST	12,8	31,7	%.
Différence d'altitude	DIFALT	65	19	m

Coefficients de corrélations remarquables :

	CONF	CULTU	FORET	CHAMP	CRIST	PENTE
Racine ALTIT	0,75	-0,90	0,72	-0,79	0,94	0,91
CONIF			0,91			0,86

Relations entre paramètres hydrologiques et paramètres physiographiques

Le tableau 8 présente les relations linéaires entre les trois paramètres hydrologiques et les caractéristiques physiographiques. Il a ainsi été possible d'identifier les relations linéaires suivantes :

— CORPLU = 0,121. DIFALT - 21,1 % (R = 0,81, t-student = 8,4) ;
— RUMAX jeu 2 = -0,37. DIFALT + 1,60 FEUIL + 95 mm (R = 0,54, t-student = -2,4 et 1,7) ;
— RUMAX jeu 1 = -0,39. GRES - 0,18. CRIST + 61 mm (R = 0,47, t-student = -2,9 et 1,9) ;
— Racine RUIPER jeu 1 = 0,107. CONIF + 5,23 (R = 0,87, t-student = 10,8) ;
— Racine RUIPER jeu 2 = 0,113. CONIF + 6,06 (R = 0,89, t-student = 11,7).

Tableau 8
Matrice de corrélation entre paramètres hydrologiques et paramètres physiographiques

	CORPLU	RUMAX Jeu 1	RUMAX Jeu 2	Racine RUIPER jeu 1	Racine RUIPER jeu 2
Racine ALTIT	/	(0,17)	(-0,27)	0,64	0,66
Racine DIFALT	0,82	(0,09)	-0,43	/	/
Racine PENTE	/	(-0,12)	-0,39	0,72	0,78
Racine CRIST	0,68	(-0,16)	(-0,18)	0,50	0,54
Racine MARNE	/	/	/	-0,58	-0,59
Racine FEUIL	-0,38	(-0,15)	0,42	-0,51	-0,56
Racine CONIF	0,68	(-0,22)	-0,38	0,87	0,89
Racine FORET	0,65	(0,21)	(-0,26)	0,80	0,80
Racine CHAMP	/	(0,10)	(0,26)	-0,79	-0,80
Meilleure corrélation multiple	0,81	/	(0,47)	0,87	0,89

D'autres régressions avec plusieurs variables explicatives ont donné des résultats comparables mais pas meilleurs.

Conclusions

On a montré sur deux exemples (Bretagne et Moselle) comment l'utilisation de données physiographiques pouvait permettre (dans une certaine mesure) de prédéterminer les paramètres hydrologiques d'un modèle global pluie-débit. Il convient de remarquer que les relations sont d'autant mieux identifiées que :

— le fichier physiographique est précis : c'est spécialement le cas du fichier Orstom de la Moselle ;
— le nombre de paramètres hydrologiques est réduit ;
— les paramètres hydrologiques sont indépendants (les fortes relations entre la correction de pluie et la capacité d'évaporation sont défavorables).

Les quelques relations mises en évidence sont robustes mais il est intéressant de montrer que la capacité d'évaporation telle qu'elle est utilisée dans le modèle ne peut pas être prédéterminée avec une grande précision... contrairement à une idée très répandue. En fait, malgré le faible nombre de paramètres utilisés (trois à cinq), il existe certainement des interactions entre paramètres et (plus grave) entre paramètres et non-représentativité de la lame d'eau. Il convient donc de rester prudent dans les prédéterminations de paramètres et de contrôler (sur les bassins mesurés) l'influence de l'imprécision sur cette détermination.

Remerciements

Le travail présenté dans cette communication a été financé par la Direction Scientifique du BRGM, en particulier dans le cadre du projet de recherche EG43 sur la spatialisation des modèles globaux.

BIBLIOGRAPHIE

FILIPPI C., SCHWARTZ J., THIERY D., 1986a - Banque de données Prophète. Rap. BRGM 86 SGN 020 EAU.

FILIPPI C., SCHWARTZ J., THIERY D., 1986b - The Prophète data-bank designed for estimating potential hydro-electric production for small power plants located anywhere in mainland France. Second International Conference on small hydro - Hangzhou, Chine.

GIRARD G., LEDOUX E., VILLENEUVE J.P., 1979 - Modèle intégré pluie - eau de surface - eau souterraine. Soc. Hydrotechnique de France, session 114, novembre 1979.

GIRARD G., MORIN G., CHARBONNEAU R., 1972 - Modèle précipitations-débits à discrétisation spatiale. Cahiers Orstom, série hydrologie, vol. IX, n° 4.

KABOUYA M., 1990 - Modélisation pluie-débit aux pas de temps mensuels et annuels en Algérie septentrionale. Thèse Doct. Ing. Univ. Paris Sud. Laborat. Hydrol. et de Géochim. isotop. ORSAY.

ROCHE P.A., THIERY D., 1984 - Simulation globale de bassins hydrologiques. Introduction à la modélisation et description du modèle Gardenia. Rap. BRGM 84 SGN 337 EAU.

THIERY D., 1985 - Analyse et modélisation des bassins de la Moselle française. Rap. BRGM 85 SGN 435 EAU.

THIERY D., 1988 - Forecast of changes in piezometric levels by a lumped hydrological model. Journal of Hydrology 97, 129-148.