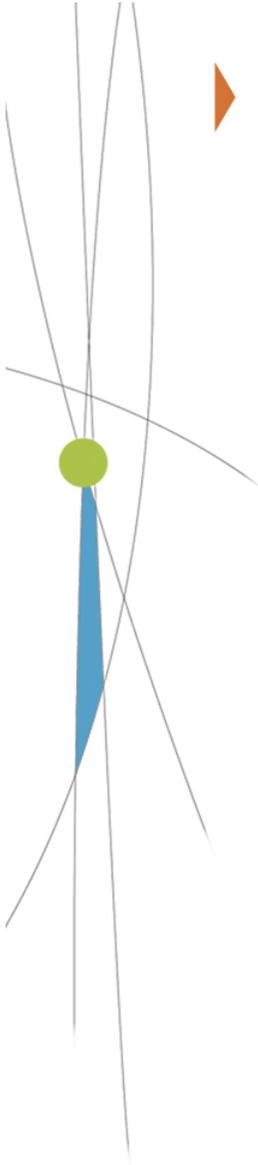


Hydrologie statistique et reconstitution des régimes naturels

Eric SAUQUET
Unité de Recherche Hydrologie-Hydraulique
Cemagref Lyon

26 avril 2010 – Givors
Journée « Gestion quantitative de la ressource »





► Contexte

**Absence de cadre de référence d'une hydrologie « naturelle »
spécialisée en France malgré des besoins de gestion quantitative
clairement identifiés**

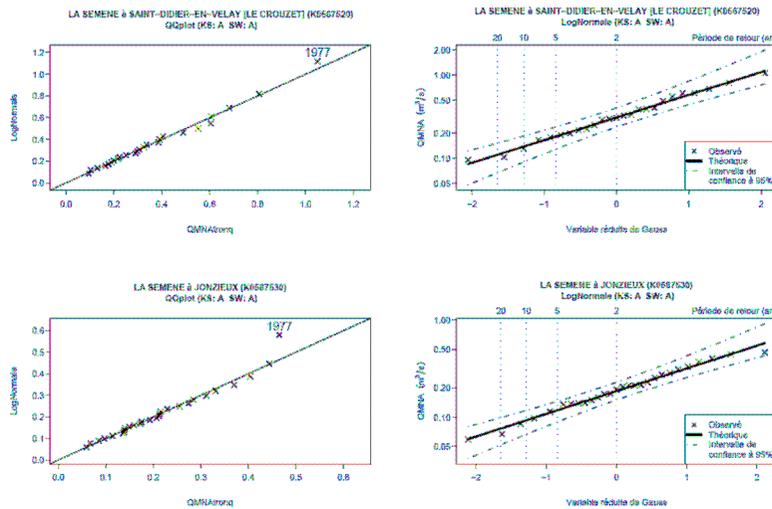
Deux questions techniques à traiter :

- affecter des débits de référence à des tronçons en extrapolant des valeurs connues en quelques points du réseau hydrographique
- reconstruire sur des sites anthropisés des débits naturels

- **Pas de technique universelle**
- **Vision pragmatique : il faut adapter la (les) méthode(s) au contexte climatique et aux données disponibles**

**Objectif de la présentation : quelques rappels et guides issus de
projets de recherche et expertises**

Les variables hydrologiques (1/2)



LA BRUCHE à RUSS ["WISCHES"]

Code station : A2732010 Bassin versant : 229 km²

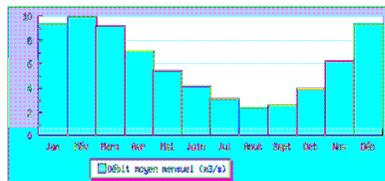
Producteur : DIREN Alsace E-mail : sema@alsace.ecologie.gouv.fr

SYNTHESE : données hydrologiques de synthèse (1962 - 2007)
Calculées le 12/09/2007 - Intervalle de confiance : 95 %

écoulements mensuels (naturels) données calculées sur 46 ans

	janv.	fév.	mars	avr.	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.	Année
Débits (m ³ /s)	9,370	9,940 #	9,210 #	7,100 #	5,390	4,180	3,130	2,380	2,580	3,940	6,190	9,360 #	6,040
Qsp (l/s/km ²)	40,9	43,4 #	40,2 #	31,0 #	23,6	18,2	13,7	10,4	11,3	17,2	27,0	40,9 #	26,4
Lame d'eau (mm)	109	108 #	107 #	80 #	63	47	36	27	29	48	70	109 #	836

Qsp : débits spécifiques
Codes de validité :
- (espace) : valeur bonne
- / : valeur reconstituée par le gestionnaire et jugée bonne
- # : valeur estimée (mesurée ou reconstituée) que le gestionnaire juge incertaine



modules interannuels (loi de Gauss - septembre à août) données calculées sur 40 ans

module (moyenne)	fréquence	quinquennale sèche	médiane	quinquennale humide
6.040 [5.650;6.440]	débits (m ³ /s)	4.900 [4.400;5.300]	6.100 [5.300;7.000]	7.400 [7.000;7.900]

basses eaux (loi de Galton - janvier à décembre) données calculées sur 46 ans

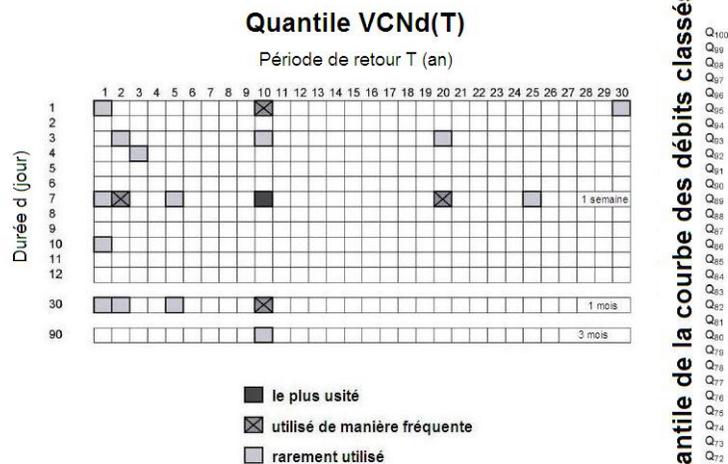
fréquence	VCN3 (m ³ /s)	VCN10 (m ³ /s)	QMNA (m ³ /s)
biennale	1.200 [1.100;1.300]	1.300 [1.200;1.400]	1.700 [1.500;1.800]
quinquennale sèche	0.960 [0.870;1.000]	1.000 [0.920;1.100]	1.300 [1.100;1.400]

En France, les variables hydrologiques privilégiées sont :

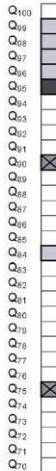
- le débit mensuel minimal annuel de fréquence quinquennale sèche, i.e. ayant une probabilité 1/5 chaque année de ne pas être dépassé (noté QMNA5)
- le débit moyen minimal continu sur d jours dans l'année de période de retour T (noté VCNdT). Les quantiles biennaux et quinquennaux secs de durées 3 et 10 jours sont présents dans les fiches de synthèse de la banque HYDRO (<http://www.hydro.eaufrance.fr/>)

▶ Les variables hydrologiques (2/2)

Les Suisses utilisent la variable Q347, baptisée Q95 dans la littérature technique anglophone, quantile extrait de la courbe des débits classés (CDC) associé à la probabilité de dépassement de 95%. Les Américains exploitent deux VCN particuliers : les 7Q10 et 7Q2, qui correspondent respectivement aux VCN7J(10) et VCN7J(2).



Quantile de la courbe des débits classés



Définition	Référence
Moyenne des débits mensuels minimums de tous les mois (m3/s)	Wood et al. (2000)
Moyenne des débits journaliers minimums dans l'année divisée par la moyenne interannuelle du débit journalier médian de chaque année	Wood et al. (2000)
Médiane des débits journaliers minimums dans l'année divisé par la moyenne interannuelle du débit journalier médian de chaque année.	Clausen et al. (2000)
Moyenne des débits minimums dans l'année divisé par la surface drainée (m3/s/km ²)	
Moyenne des débits journaliers minimums dans l'année divisée par la moyenne interannuelle du débit journalier moyen de chaque année	Poff and Ward (1989)
Ratio du volume généré par l'écoulement de base divisé par le volume total écoulé	Clausen and Biggs (1997, 2000), Clausen et al. (2000)
Débit moyen sur 7 jours minimal divisé par la moyenne interannuelle du débit journalier moyen de chaque année	Richter et al. (1998)
Moyenne interannuelle du rapport du débit journalier minimal dans l'année divisé par la moyenne des débits journaliers sur l'année	Poff (1996)
Quantile de débit moyen minimal dans l'année continu sur les durées de 1, 3, 7, 30 et 90 jours	Richter et al. (1996, 1997, 1998)
Moyenne des débits moyens minimums dans l'année continus sur les durées de 1, 7 et 30 jours, divisés par le débit médian	Clausen et al. (2000)
Moyenne interannuelle des rapports entre quantiles issus de la courbe des débits classés de fréquence au dépassement de 75 ou 90% de l'année divisée par la médiane Q50 de l'année (Q75/Q50 ou Q90/Q50)	Clausen and Biggs (1997, 2000), Clausen et al. (2000)
Durée moyenne des événements sous un seuil spécifique	Richter et al. (1996, 1997, 1998)
Nombre de jours moyen avec débit nul	Poff and Ward (1989), Poff (1996), Richter et al. (1997)

Extrait de « Pyrcce R., 2004. Hydrological Low Flow Indices and their Uses. WSC Report No. 04-2004, August 2004 »

▶ Les exemples autrichien et suisse

Stratégie à adopter pour l'estimation du Q95 selon le type de données disponible en Autriche (extrait de Laaha et Blöschl, 2007)

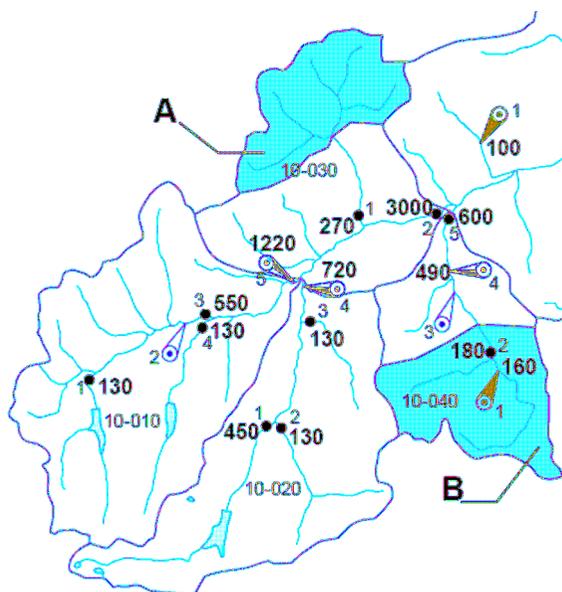
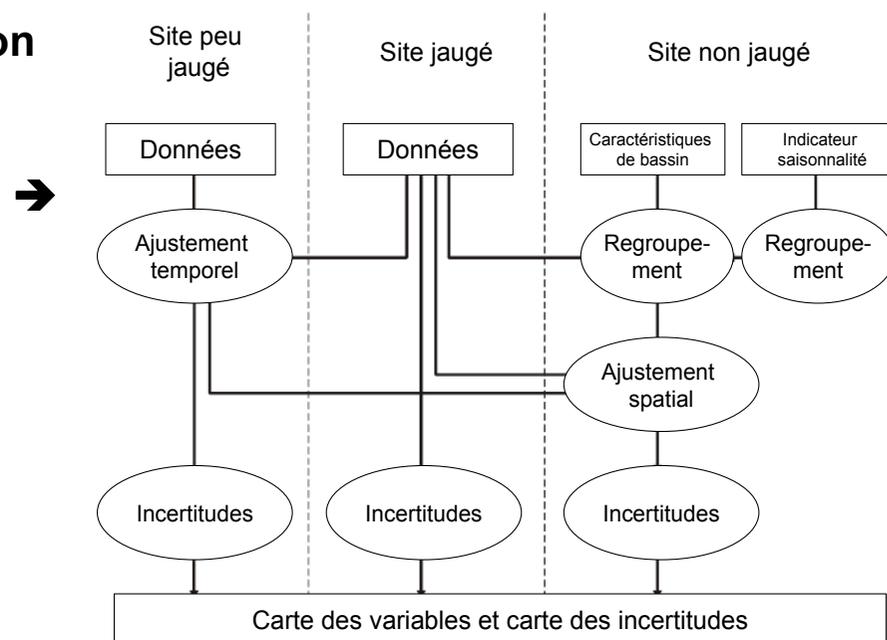


Figure 7.8 :

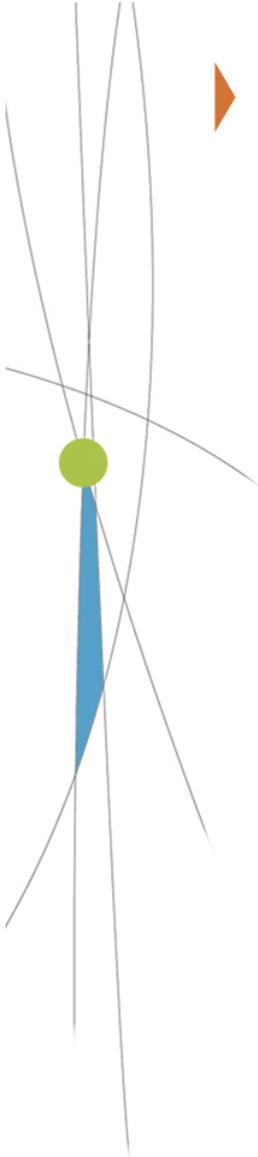
Exemples de calcul d'une valeur approximative du débit Q_{95} sur la base de la carte *Éléments pour la détermination du débit Q_{95}*

Cas A) : Russleinbach : Extrapolation en amont du premier point de détermination

Cas B) : Somvixer Rhein : Interpolation entre deux points de détermination



← **Support cartographique (extrait de http://hydrant.unibe.ch/hades/hades_fr.htm)**



▶ La recherche de bassins témoins similaires

ou la quête du ...

SACRÉ GRAAL!

A la base de toutes les méthodes d'estimation en site non jaugé : **recherche de bassins hydrologiquement proches qui auraient le même comportement que le bassin non jaugé... et *in fine* les mêmes statistiques**

Ces bassins témoins forment des **régions « homogènes »**. La question de leur élaboration est délicate. Il peut s'agir d'un voisinage fixe, sous forme de régions homogènes contiguës ou non, ou de voisinages glissant.

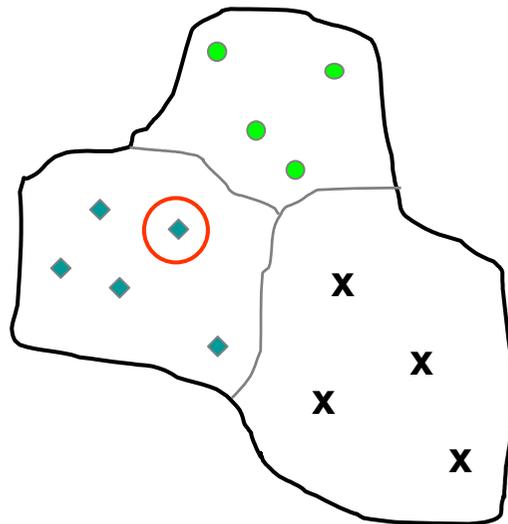
Nécessité de construire un critère de similitude pertinent fondé par exemple sur des variables auxiliaires.

Aucun découpage ne peut se prétendre universel : il est associé à la variable hydrologique pour lequel il a été construit (donc doit être renouvelé lorsqu'une autre variable est étudiée), il est fonction du degré d'expertise de l'hydrologue et du critère de similitude entre bassins.

Les questions soulevées lors de la construction des régions homogènes n'ont pas de réponse immédiate, ce sont les résultats qui a posteriori valideront les choix.

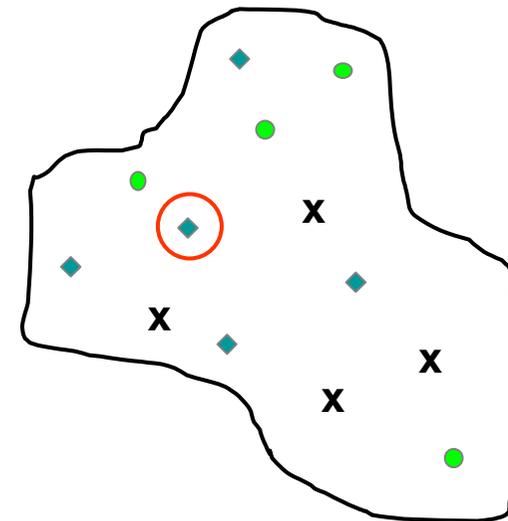
Quelles régions ?

Régions contiguës



- ◆ Région 1
- Région 2
- x Région 3
- Station non jaugée

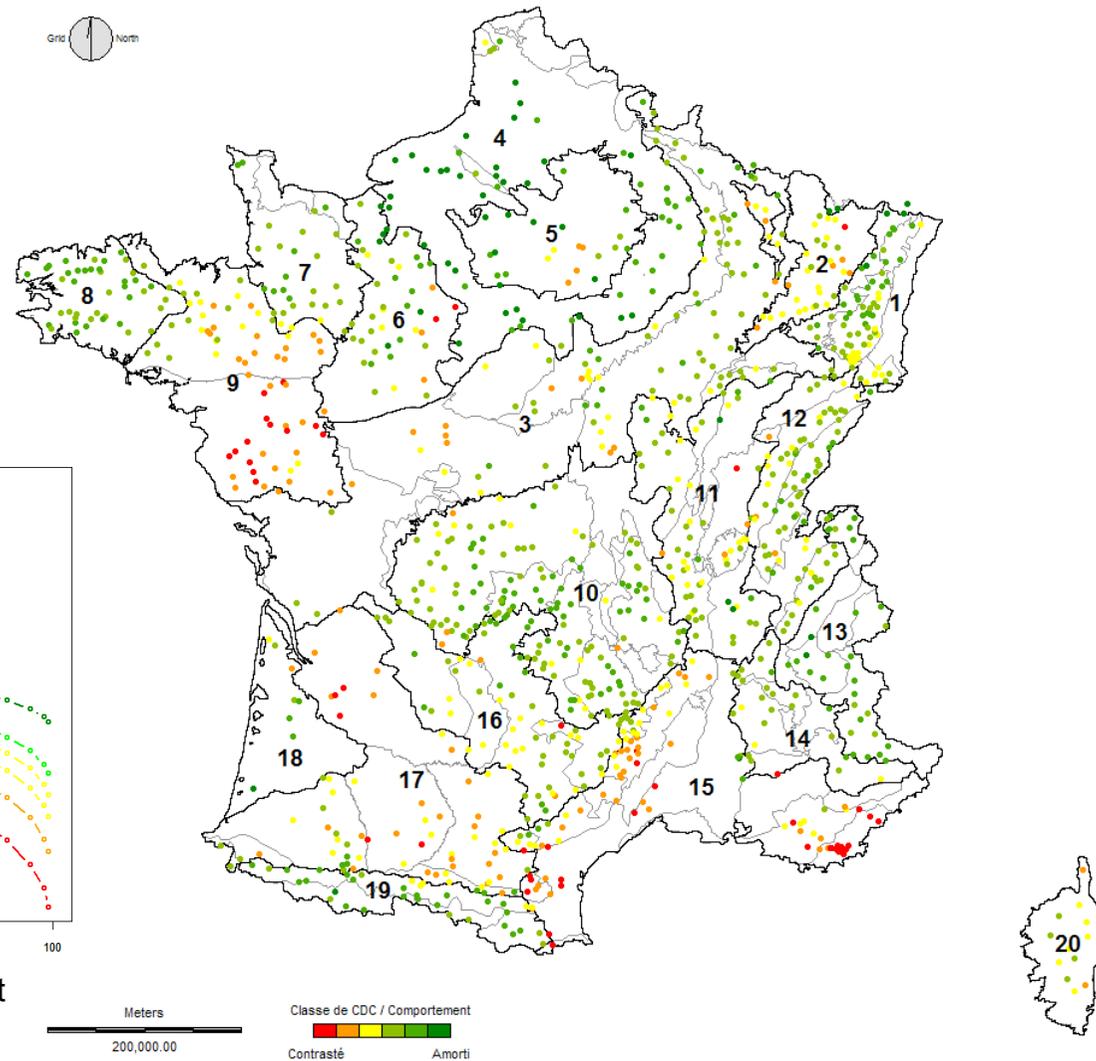
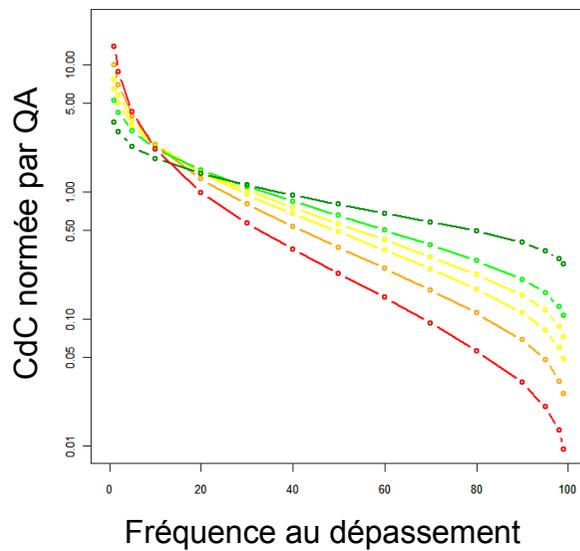
Régions non contiguës



Les bassins sont proches dans un espace hydrologique qui n'est plus l'espace géographique classique

► Un exemple français

Les courbes de débits classés (CdC) :
typologie basée sur un
assemblage des HER
de niveau II en 20
régions hydrologiques



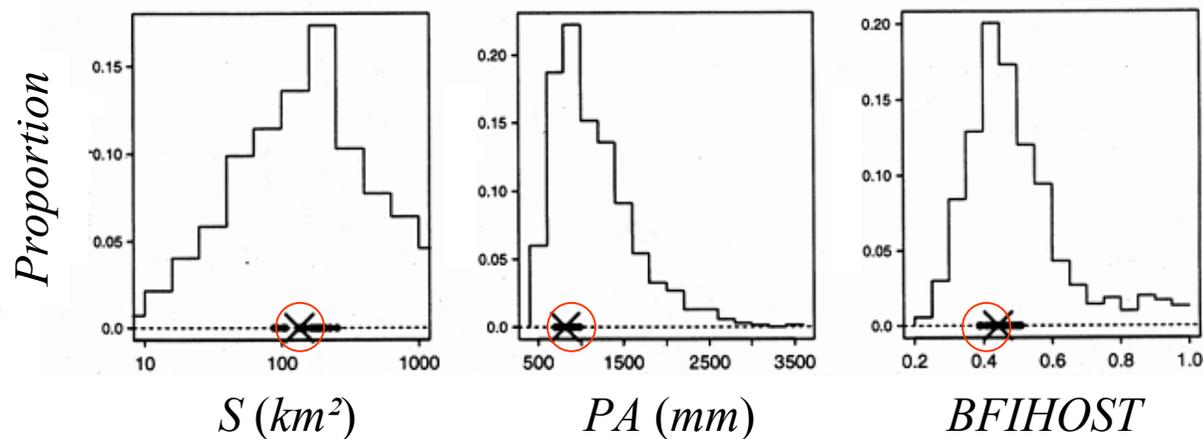
Cf. travaux Onema-Cemagref (Catalogne et Sauquet, 2010)

Un exemple anglais

Mesure de la similitude entre bassins

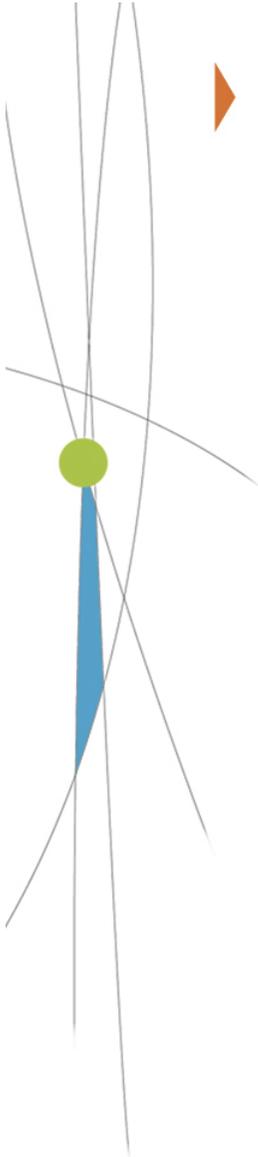
$$distance(bassin_i; bassin_j) = fonction(S_i - S_j; PA_i - PA_j; BFIHOST_i - BFIHOST_j)$$

avec S : surface de bassin versant ; PA : pluviométrie annuelle moyenne (mm) et $BFIHOST$: indice caractérisant les sols



Localisation des bassins voisins ●
du site non jaugé ○

Extrait de « Statistical procedures for flood frequency estimation » (CEH, 1999)



► Estimation en site non jaugé q^* (1/2)

Exploitation des débits de référence connus q des N bassins jaugés de la région

$$q^*(A_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i q(A_i)$$

avec A_0 bassin non jaugé et A_i , $i=1, \dots, N$, bassins jaugés

Plusieurs options :

$\lambda_i = 1 \rightarrow$ l'estimation est donnée par la moyenne des valeurs
 $\lambda_i = \text{fonction de la distance} \rightarrow$ l'estimation est une moyenne pondérée et les poids peuvent être déduits d'un système matriciel faisant apparaître les corrélations spatiales (cf. méthodes géostatistiques) ou plus simplement être définis par l'inverse de la distance

► Estimation en site non jaugé q^* (2/2)

Exploitation des formules empiriques calées sur les débits de référence connus q des N bassins jaugés de la région :

$$q^*(A_0) = f(Y_1(A_0), Y_2(A_0), \dots, Y_M(A_0))$$

avec A_0 bassin non jaugé et $Y(A)$, $i = 1, \dots, M$ caractéristiques connues sur le bassin A

Plusieurs options :

f est donnée par une régression linéaire $\rightarrow q^*(A_0) = \sum_{i=1}^M \alpha_i Y(A_0)$

f est donnée par un modèle puissance $\rightarrow q^*(A_0) = \prod_{i=1}^M \alpha_i [Y(A_0)]^{\alpha_i}$

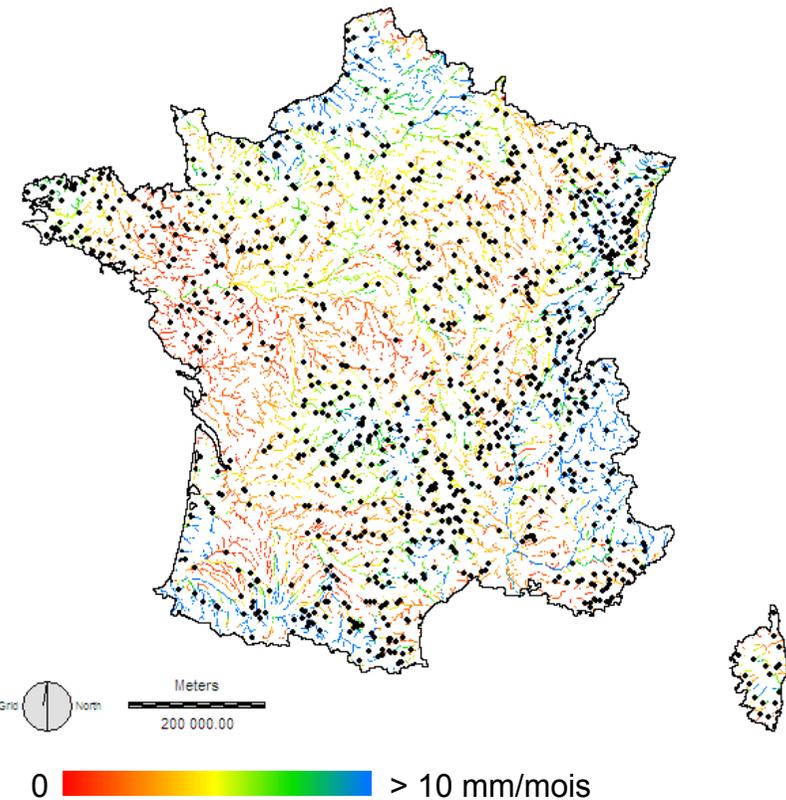
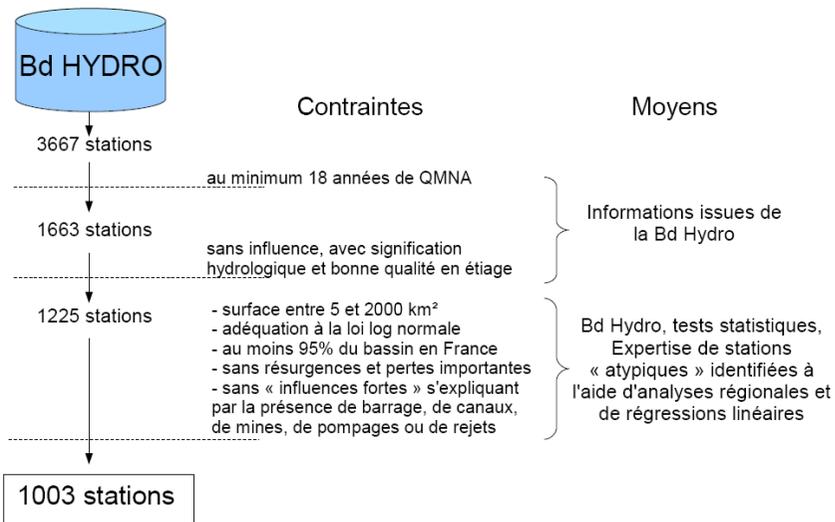
ou autres formulations empiriques ???

- Couplage possible avec le schéma d'interpolation précédent (interpolation du résidu = la part non expliquée par la formule empirique)

▶ Le débit mensuel minimal de période de retour 5 ans

Résultats exploitant
les HER de niveau II,
des formules empiriques
et interpolation des
résidus →

*Cf. travaux Onema-Cemagref en cours
(Plasse et Sauquet, 2010)*

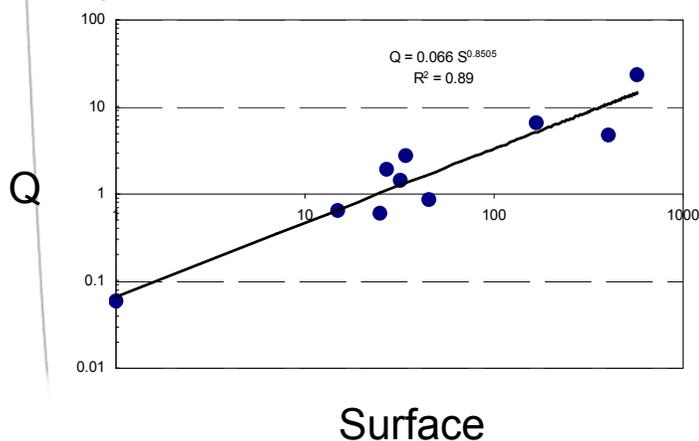


→ Permet de dégager des
grands contrastes à l'échelle du
territoire

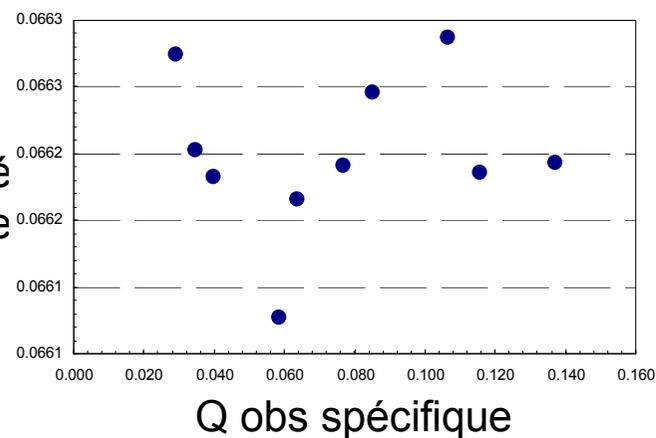
► L'interpolation en résumé... (1/2)

Quelques précautions d'usage

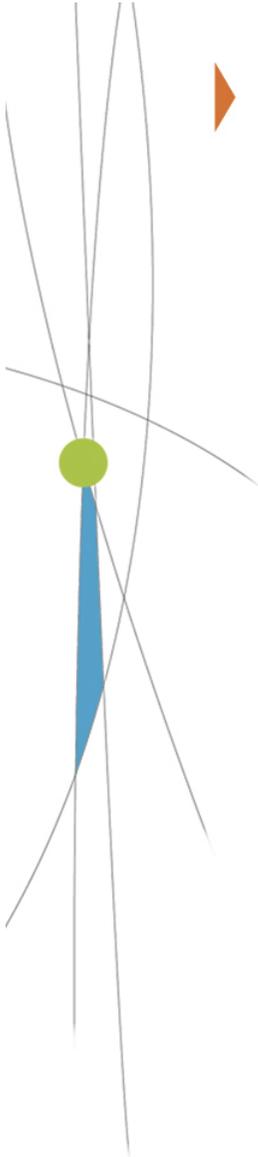
- Choisir des variables auxiliaires dans les relations empiriques ayant un sens en termes de processus hydrologiques et vérifier le réalisme des coefficients associés à ces variables (dans les formulations linéaire ou puissance)
- Plus une variable est caractéristique d'extrême hydrologique, plus elle est difficile à estimer
- Valider les procédures sur des débits exprimés en l/s/km² ou mm/mois



Q estimé
spécifique



**Appréciation plus exigeante sur
les débits spécifiques**



▶ L'interpolation en résumé... (2/2)

Quelques précautions d'usage

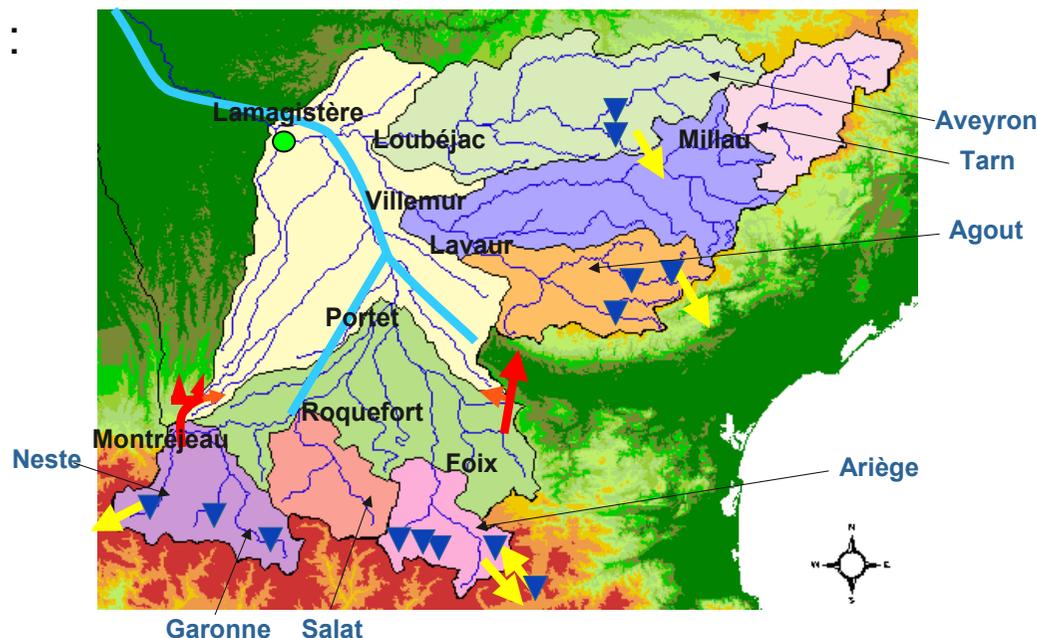
- Difficulté d'insérer les variables géologiques
- Attention à la connaissance des données auxiliaires (parfois elles aussi extrapolées) - ex. en montagne, la pluie est mal appréciée en altitude - s'appuyer sur une donnée incertaine peut être dangereux
- Choix de la procédure à conserver (modalité de construction de la région, formulation mathématique de la relation empirique,...) **en validation croisée** : *une station du jeu de données de référence est exclue, une estimation est fournie sur la base des stations restantes et est comparée au débit effectivement observé. C'est la seule preuve de la pertinence des formules et une opération permettant le calcul des incertitudes*
- Exploiter si possible des « **jaugeages épisodiques** », mesures ponctuelles au droit de sites non jaugés quand l'incertitude est inacceptable (quelques jaugeages en étiage sur quelques années peuvent permettre une meilleure estimation que l'interpolation)

▶ La reconstitution de régimes naturels

Rares sont les bassins sans influences humaines, malgré les commentaires de la banque HYDRO

Exemple pathologique :
le bassin versant
de la Garonne
à Lamagistère
(32350 km²)
et huit autres
sous bassins
versants

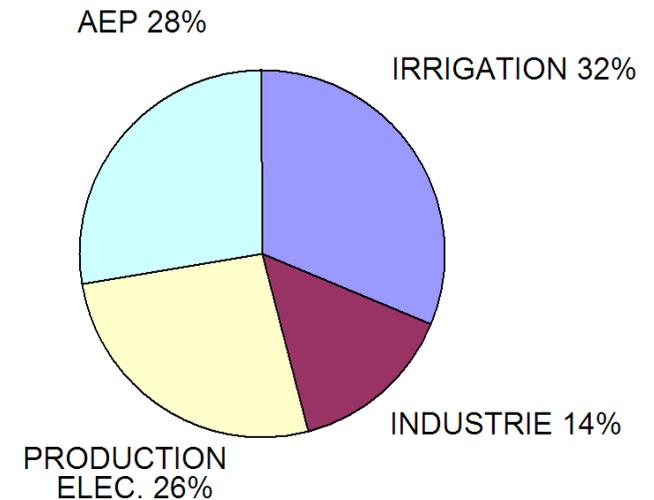
Besoin de
reconstruire une
hydrologie naturelle
pour les besoins
de modélisation
sous changement
climatique



- ▶ Hydroélectricité
- ▶ Irrigation
- ▼ Principales retenues
- Canaux
- Centrale nucléaire de Golfech

▶ Les données

- Effort de collecte de données **conséquent** mais certainement incomplet
 - Priorité donnée aux grandes sources de perturbation et aux transferts inter-bassins
 - Facilité d'accès : voies navigables / CNPE Golfech
- Données exploitées :
 - Données hydrométriques (EDF, HYDRO)
 - Réanalyse SAFRAN (Météo-France)
 - Données d'usage (prélèvements, source Agence de l'Eau Adour Garonne, variations des réserves, source EDF)
- **Bilan : correction des grandes influences saisonnières** (grandes réserves hydro-électriques, prélèvements agricoles)

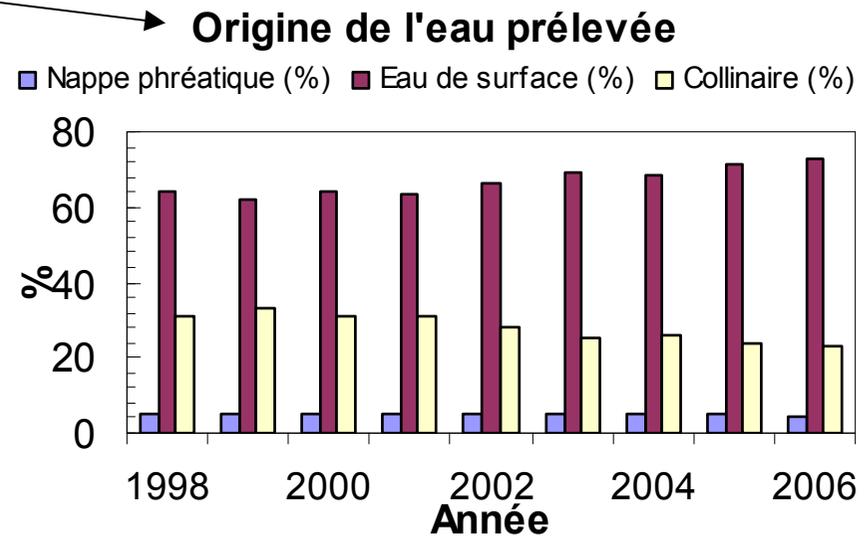
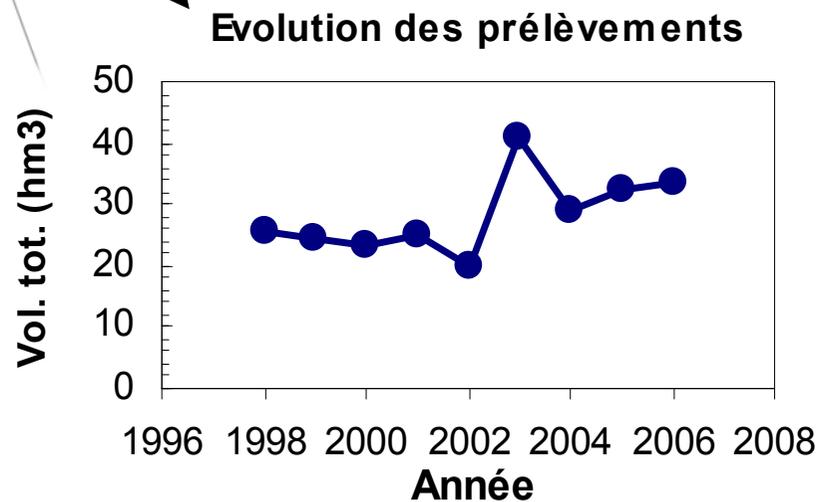


**Répartition prélèvements
par type d'usage
Total : 826.4 Mm3 en 2006**

► Correction de l'irrigation (1/2)

- Information disponible sur quelques années, pas de vision des prélèvements à l'échelle journalière
- Nécessité :

- d'un modèle pour quantifier le besoin en eau de la plante
- de traduire dans le temps la soustraction à la ressource (représentation par une réserve globale simulant le remplissage/la vidange des stocks collinaires)



► Correction de l'irrigation (2/2)

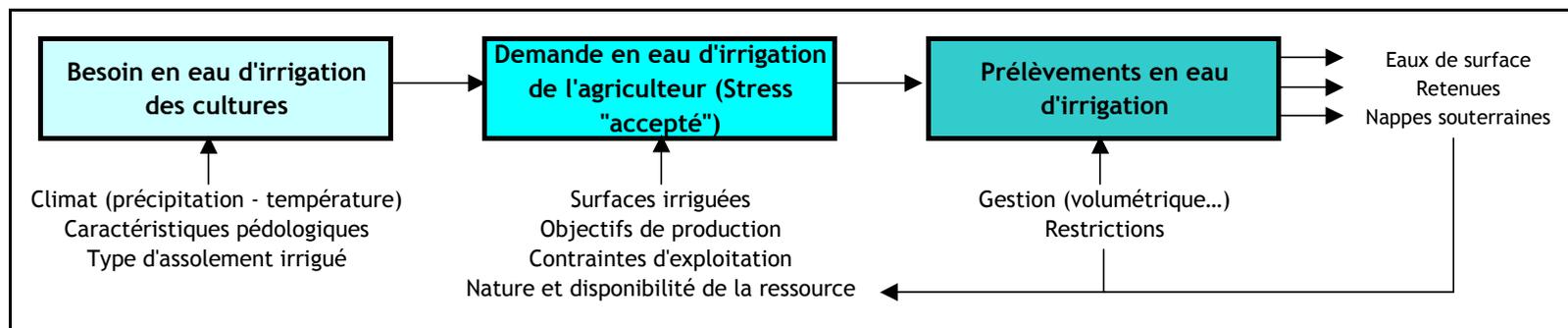
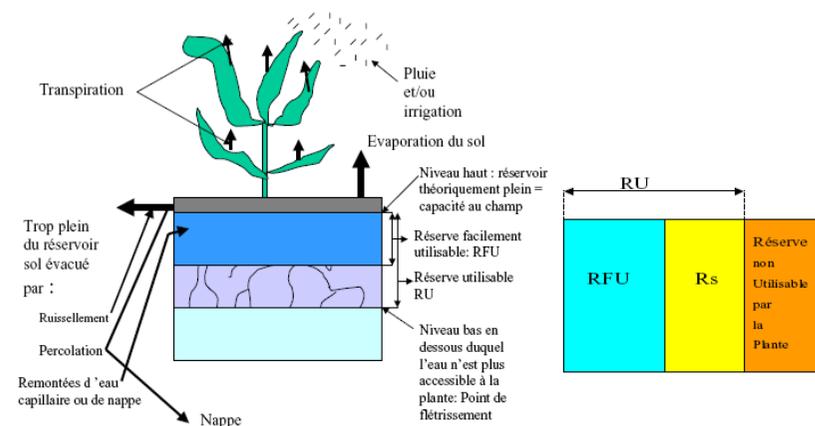
Modèle de bilan hydrique à deux réservoirs et un horizon

→ Quantité quotidienne nécessaire pour que la plante ne subisse pas de stress hydrique

$$S(t) = S(t-1) + P(t) + Irr(t) - ETR(t) - D(t)$$

avec :

- P : précipitation
- Irr : apports par irrigation
- D : part d'eau perdue par drainage
- S : évolution du stock d'eau dans la réserve utile

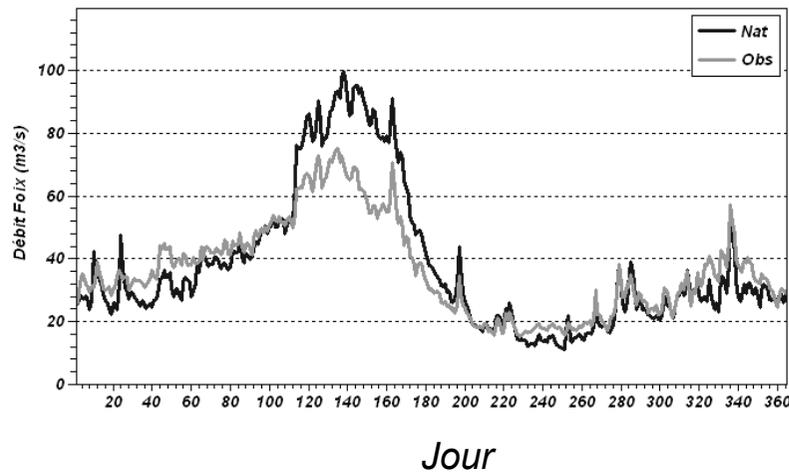


► Correction l'hydroélectricité

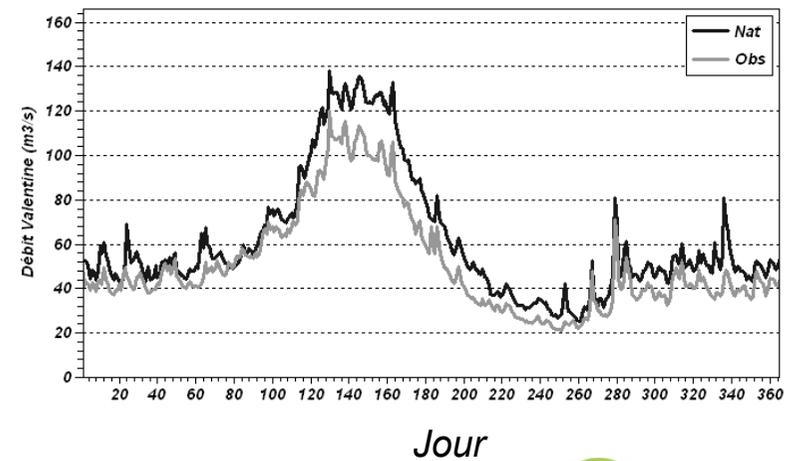
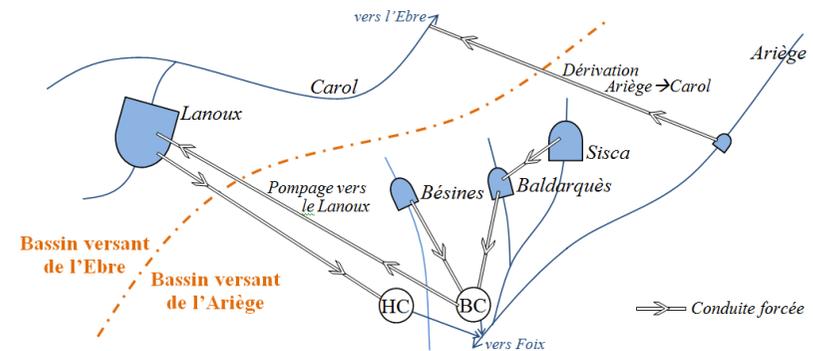
- Exploitation possible du bilan des aménagements → Approche comptable :

- **Cas simple !** $Q_{naturalisé}(t) = Q_{observé}(t) + \sum_{Retennes} \Delta Res(t)$

- Exemples : l'Ariège à Foix



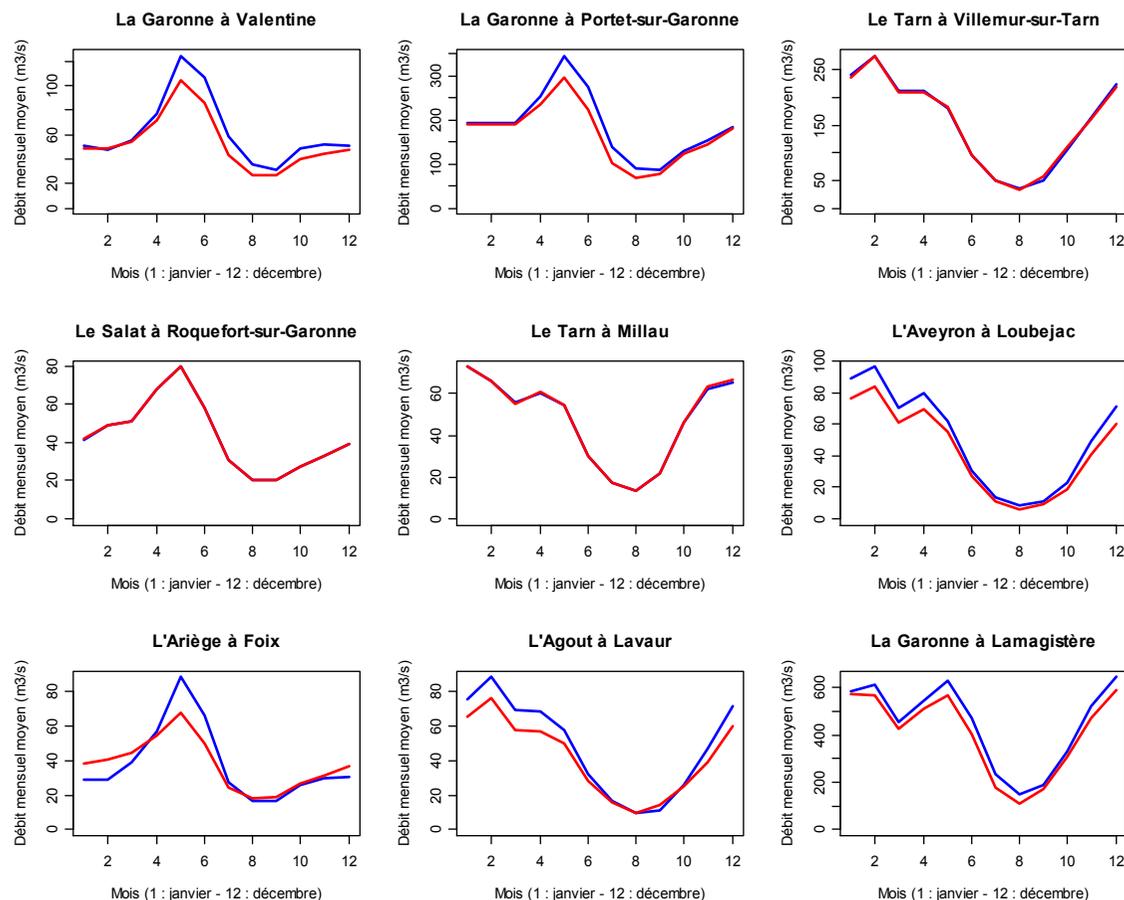
et la Garonne à Valentine
corrigée de l'hydro-électricité et
de la dérivation Neste vers
l'Adour



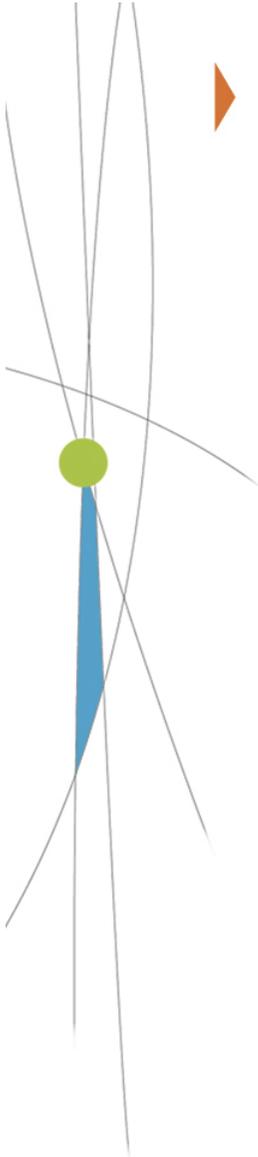
► Bilan (1/2)

- Débits mensuels moyens observés et naturels reconstitués (période maximale 1970-2005)

— régime naturel
— débits observés aux stations

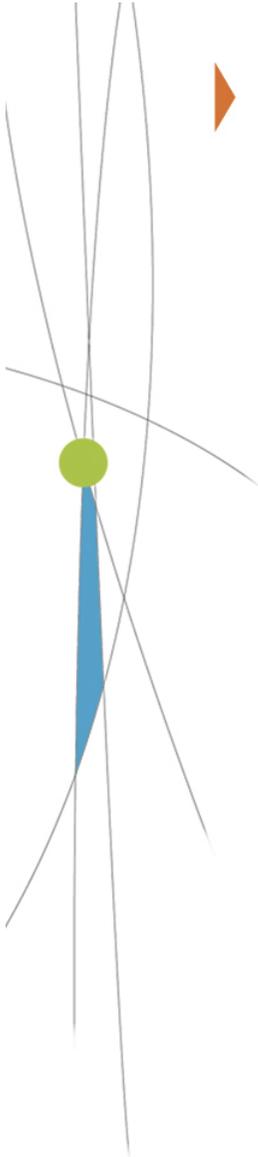


Effets de cette correction sur les étiages de la Garonne à Lamagistère : le débit moyen d'août est égal à 150 m³/s dans sa configuration naturelle contre 110 m³/s en contexte influencé ; le QMNA5 est égal à 100 m³/s en configuration naturelle contre 80 m³/s en contexte influencé



► Bilan (2/2)

- Les **influences agricoles** ont dû être **modélisées** car peu de données mesurées
- L'influence de l'**hydroélectricité** est limitée aux ouvrages soit à **influence saisonnière**, soit organisant des **transferts** entre bassins
- A l'échelle du territoire et sur la période 1970-2005, seule la période **[1990-1997] U [1999-2000]** permet de construire un jeu de témoins naturels du fait du croisement de la disponibilité des différentes sources de données
- **Effort sur trois ans !!!**



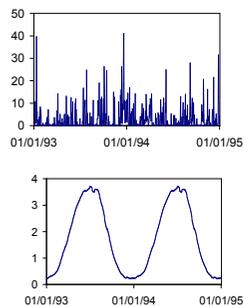
▶ La reconstitution en résumé... (1/2)

- Hiérarchiser les usages et leurs impacts
- Remonter aux besoins exprimés et en déduire – sous hypothèses – les consommations réelles
- Difficulté réelle de reconstituer une hydrologie naturelle → nécessite une modélisation physique distribuée des différents compartiments participants au cycle de l'eau
- S'appuyer sur les données les plus récentes (des vraies « mesures », cf. redevance des agences) et exploiter des « proxy » pour remonter dans le temps
- Travail délicat, dont nous ne connaissons pas les incertitudes exactes

▶ La reconstitution en résumé... (2/2)

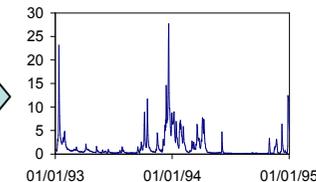
- La modélisation hydrologique peut elle nous sauver ?
- Modèle pluie-débit : outil de simulation des débits à l'exutoire d'un bassin versant à partir de variables météorologiques

Variables d'entrée
(pluie, température,
évapotranspiration potentielle)



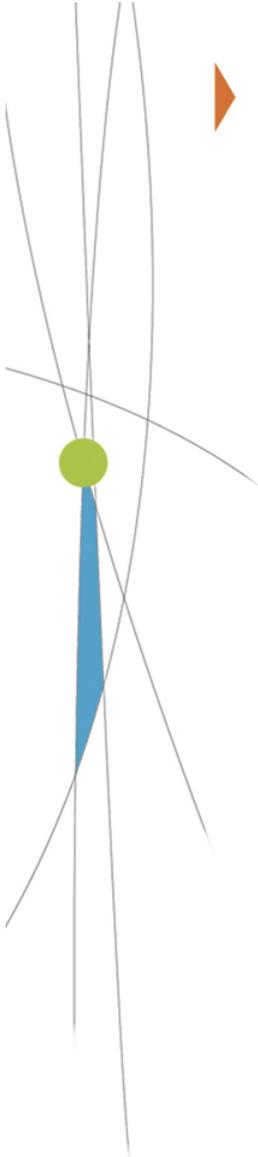
**Modèle
pluie-débit
(paramètres, variables
internes)**

Variables de sortie :
débit
(autres variables plus délicates
à valider)



**A CALER
sur des débits
naturels**

**A INTERPOLER
en site non jaugé**



► Bibliographie

- Interpolation des débits de référence :
 - Plasse J, Sauquet E., 2010. Interpolation des débits de référence d'étiage. Rapport d'étude, Cemagref, mai 2010, 166 pages.
 - Catalogne C., Sauquet E., 2010. Interpolation des courbes des débits classés. Rapport d'étude, Cemagref, mai 2010, 97 pages.
 - Note sur les débits réservés (actualisation note technique loi Pêche) prévue en juin 2010
- Jaugeages épisodiques :
 - Chopart S., Sauquet E., 2008. Usage des jaugeages volants en régionalisation des débits d'étiage. Revue des sciences de l'eau, 21(3)-267-281
- Centre de documentation du Cemagref :
 - <http://cemadoc.cemagref.fr/basepubli.html>
- **Projet Imagine2030 « Climat et aménagements de la Garonne : Quelles incertitudes sur la ressource en eau en 2030 ? » :**
<http://www.cemagref.fr/le-cemagref/lorganisation/les-centres/lyon/ur-hhly/hydrologie-des-bassins-versants/projets/programme-abrisque-decision-territoirebb-du-ministere-de-l2019ecologie-et-du-developpement-durable-ressources-en-eau-sur-le-bassin-de-la-garonne>