



EPTB *Charente*

Institution interdépartementale pour l'aménagement
du fleuve Charente et de ses affluents

PRESTATION CONCERNANT LE CYCLE DE L'EAU ET LA GESTION DES ETIAGES SUR LA BASSIN FLUVIAL DE LA CHARENTE

COMPTE RENDU DE MISSION

MISSION 02-3

Bon de commande n° 08-11

**Développement d'un modèle estuarien:
Lien débit / salinité**

ANNEE 2009

Juillet 2009



SOMMAIRE

1 - Préambule 1

2 - Reconstitution des débits de la Charente à l'estuaire 2

2.1 - Reconstitution des débits en période de hautes eaux 2

2.2 - Reconstitution des débits à l'étiage 4

2.3 - Résultats 6

3 - Analyse des liens entre salinité et débits entrants à l'estuaire 9

3.1 - Origine des données 9

3.2 - Analyse des corrélations entre débit amont et salinité 10

3.3 - Résultats : reconstitution des débits « historiques » à partir de la salinité 13

3.4 - Enseignements de la comparaison des deux approches sur les débits de la Charente à l'estuaire 14

1 - Préambule

La mesure des débits sur le bassin de la Charente est un exercice complexe, particulièrement délicat à l'approche de l'estuaire (influences maritimes, manœuvres du barrage de Saint Savinien et des apports de nappes à l'aval).

La connaissance des apports à l'estuaire est pourtant une donnée nécessaire au suivi du respect des objectifs définis par le PGE (DOE de 12 m³/s à l'estuaire) et à l'évaluation globale des politiques de gestion quantitative du bassin amont. Cet objectif quantitatif est déterminant pour la salinité estuarienne en lien notamment avec les enjeux de bon fonctionnement de l'écosystème estuarien et littoral et aussi de l'activité ostréicole.

Sur le plan méthodologique, l'objet de cette étude est donc dans un premier temps de proposer une reconstitution des débits fluviaux historiques entrant à l'estuaire non mesurables directement.

Ces débits reconstitués sont le fruit de différentes hypothèses, explicitées dans ce rapport et mobilisant différents outils (stations de mesures DIREN, modèles pluie débit, modèles d'impact PGE).

La validation de ces résultats nécessite cependant d'identifier des éléments de calage de ces hypothèses ; la dilution saline fait justement partie de paramètres pouvant jouer ce rôle. Le lien entre hydrologie et salinité reste cependant très délicat à établir à partir de modélisation hydrologique qui elle même devrait être calée à partir de la connaissance des apports fluviaux !

C'est pourquoi, il est proposé d'étudier, au travers de corrélations mathématiques et d'itérations, les liens entre l'hydrologie de la Charente et les mesures de salinité dans l'estuaire (Fort Lupin).

L'analyse de ces résultats permettra d'évaluer si :

- Les corrélations obtenues entre débits reconstitués et salinité, permettent en retour de critiquer les hypothèses de reconstitution des débits amont ;
- La mesure de la salinité dans l'estuaire peut représenter un bon indicateur pour évaluer les débits entrant à l'estuaire.

Cet exercice d'aller et retour entre ces deux paramètres permet ainsi d'approfondir les liens entre fonctionnement du grand bassin amont et du littoral.

La compréhension de ces liens pourrait par exemple contribuer à évaluer la salinité dans l'estuaire sur la base des débits naturels reconstitués ou évaluer l'incidence des effets attendus des changements climatiques sur l'estuaire de la Charente.

2 - Reconstitution des débits de la Charente à l'estuaire

La reconstitution des débits de la Charente à l'estuaire a été réalisée en deux temps : en hautes eaux puis à l'étiage.

En effet, l'«étude de valorisation des bases de données qualité des eaux dans le bassin de Marennes Oléron et le bassin de la Charente», réalisé par Eaucéa en décembre 2006 pour l'Ifremer, a montré que les débits de hautes eaux à l'estuaire pouvaient être évalués sur la base de corrélations entre les stations de mesures, contrairement à la période d'étiage où se posent des problèmes liés à la fiabilité des stations et à l'impact des prélèvements.

Une approche spécifique a donc été développée à l'étiage, basée sur la reconstitution de débits naturels, réinfluencés des prélèvements par un modèle d'impact de type PGE (cf. «Développement du modèle CycleauPE : Charente à l'estuaire» ; réalisé en mai 2009 par Eaucéa pour l'EPTB Charente).

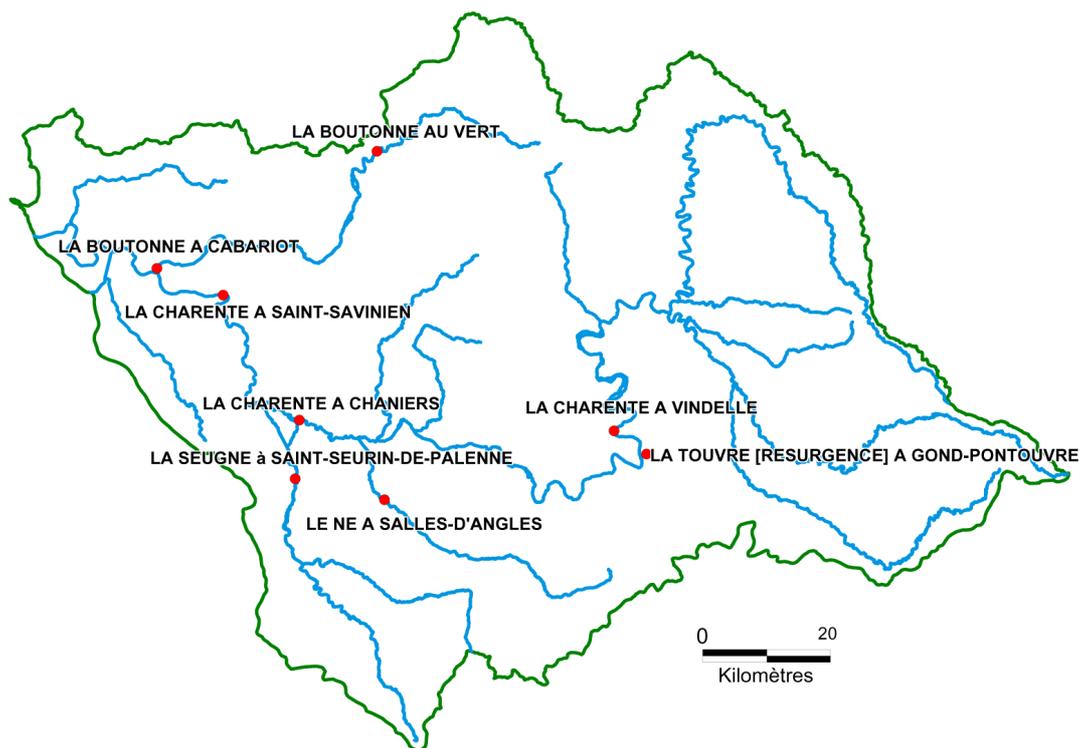
Ces deux approches sont détaillées avant de présenter les résultats de la reconstitution des débits de la Charente à l'estuaire.

2.1 - Reconstitution des débits en période de hautes eaux

La station de Saint-Savinien (au niveau du barrage) est la station la plus en aval sur le bassin. Néanmoins, ces données sont éparées du fait des contraintes de mesure à cet endroit (manœuvres du barrage). Les chroniques sont donc largement incomplètes et présentent de nombreuses valeurs douteuses. De plus, les apports de la Boutonne (environ 15% de la surface du bassin de la Charente), situés à l'aval de Saint Savinien, ne sont pas pris en compte.

Pour améliorer la fiabilité des mesures de débit sur la Charente aval, la station de Saint-Savinien a été remontée au pont de Beillant (commune de Chaniers) par la DIREN en 2004. Cette station bien que plus fiable, est située en amont de la confluence avec la Seugne (environ 15% de la surface du bassin de la Charente). De plus, le court historique des chroniques limite les analyses hydrologiques.

Situation des stations de mesure des débits sur le bassin de la Charente



Pour la reconstitution des débits à l'estuaire, la première approche peut être de considérer que les apports à l'estuaire sont égaux au débit de Saint-savinien additionnés à ceux de la Boutonne à Carillon [Cabariot].

Lorsque les débits à ces stations ne sont pas disponibles, ce qui est le cas la plupart du temps, ils sont reconstitués grâce aux débits des stations amont sur la base d'une relation de corrélation. Les méthodes de corrélation utilisées sont simples et basées sur la comparaison des débits mesurés entre plusieurs stations. Ainsi :

- ✓ Concernant les apports de la Boutonne, comme Carillon est uniquement disponible sur la période 2002-2006, on utilise les débits à la station de Moulin de Chatre, avec un coefficient multiplicateur traduisant l'augmentation de bassin versant.
- ✓ Pour la Charente, lorsque les débits à Saint-Savinien sont indisponibles, on utilise la somme des débits de Pont de Beillant additionnés à ceux de la Seugne (station de la Lijardière [Saint Seurin de Palenne]).
- ✓ Lorsque Beillant n'est pas disponible, on remonte à Jarnac, avec une corrélation entre Jarnac + Seugne et Saint-Savinien, ou bien une corrélation entre Jarnac et Saint-Savinien directement, si les débits de la Seugne sont indisponibles.
- ✓ Enfin, si Jarnac est indisponible, on la reconstitue avec une somme pondérée de Vindelle sur la Charente et Foulpougne sur la Touvre. La pondération prend en compte les différences majeures entre les régimes de la Charente amont et la Touvre, qui est issue des résurgences du karst de La Rochefoucauld.

Des imprécisions sur l'estimation du débit à l'estuaire sont inhérentes à ce type de corrélations, mais ces reconstitutions permettent néanmoins de compléter les chroniques de débits « historiques » qui seront évaluées au regard des chroniques sur la salinité.

L'imprécision la plus importante concerne la période d'étiage. En effet, la reconstitution des débits via les stations amont n'intègre pas les prélèvements relativement importants de la partie aval :

- Pour la Boutonne, les débits mesurés à Moulin de Chatres sont plus élevés que ceux enregistrés à Carillon. La Boutonne est ainsi régulièrement en rupture d'écoulement dans sa partie aval alors que les écoulements sont pérennes en amont. Cet écart est lié aux consommations naturelles et anthropiques importantes du Val de Boutonne.
- Pour la Charente à Saint Savinien, les débits sont en grande partie reconstitués grâce aux stations amont et de ce fait ne retranscrivent pas la dérivation réalisée par le canal de l'UNIMA, de l'ordre de 3 m³/s au maximum.
- Le bassin versant à l'aval de St Savinien et de Carillon représente environ 1000 km², il se compose principalement des bassins de l'Arnoult et de la Devise, ce sont des bassins versants très plats avec un fonctionnement hydraulique de marais dans leur partie aval. A l'étiage, les apports de ces deux cours d'eau à la Charente sont nuls car tout apport des ces bassins sert à alimenter les marais qui sont sans lien avec la Charente au printemps et à l'été. En hiver, l'évacuation de l'eau des marais se fait principalement directement à la mer. L'hypothèse est donc faite que toute la superficie ces bassins versants ne contribue pas aux apports à la Charente et que les prélèvements sur ces cours d'eau n'impactent pas les débits de la Charente à l'estuaire.

2.2 - Reconstitution des débits à l'étiage

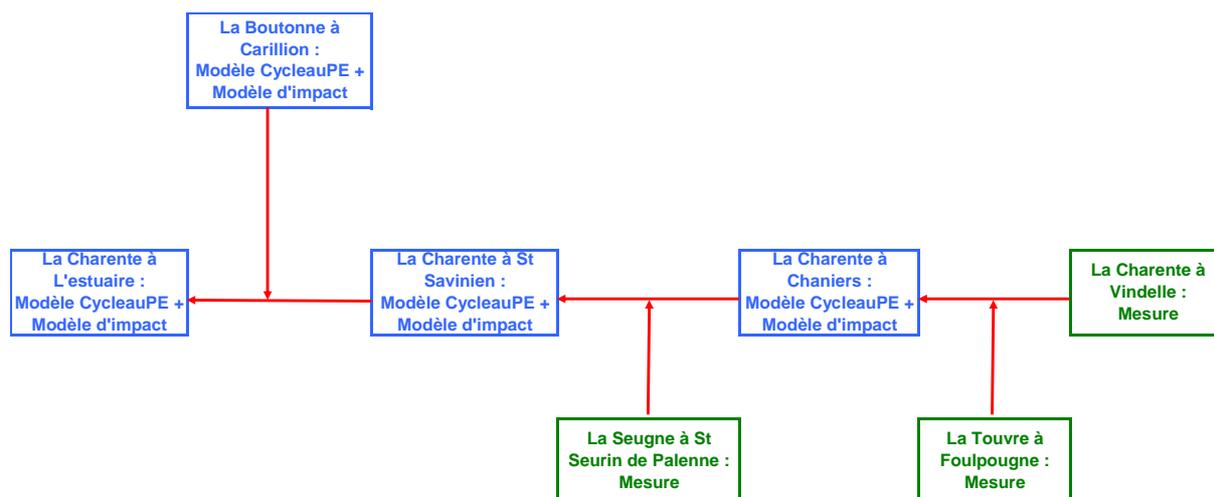
Au vu des éléments visés ci avant, un travail de reconstitution des débits « historiques » sur la période d'étiage a été effectué en trois étapes en mobilisant :

1. Les stations de mesures apportant des données jugées fiables et couvrant une période assez longue,
2. Complétées par une modélisation pluie-débit permettant de simuler les autres secteurs. Cette étape permet la reconstitution de débits naturels.
3. Ces débits naturels sont ensuite réinfluencés au moyen d'un modèle d'impact (de type PGE) qui intègre les différents usages de l'eau : prélèvements pour l'irrigation (et restrictions), l'adduction en eau potable, le canal de l'UNIMA.

Précisons que la reconstitution des débits « historiques » est également basée sur une logique descendante, de l'amont vers l'aval : la reconstitution d'une station est appuyée sur les stations amont jugées fiables, additionnées des apports naturels intermédiaires, influencés des prélèvements.

La figure ci-dessous schématise cette logique de modélisation.

Organigramme de modélisation des débits d'étiage de la Charente



1. Mobilisation des stations de mesures fiables

Les débits mesurés sont les débits moyens journaliers issus de la Banque Hydro. Au vu de la période couverte par des mesures et de la fiabilité de certaines données, seulement trois stations ont été retenues (Vindelle, Foulpougne, St Seurin de Palenne).

2. Modèle pluie débit (CycleauPE) : reconstitution des débits naturels

CycleauPE (Cycle de l'eau Pour les Etiages) est un modèle pluie – débit à réservoirs, c'est-à-dire qu'il simule les débits en fonction des seules données météorologiques de pluie et d'évapotranspiration, en modélisant les différents compartiments du sol et du sous-sol par des réservoirs qui sont régis par des relations mathématiques (vidange, remplissage, transfert, influence, ...). Le détail du fonctionnement du modèle CycleauPE est reporté en Annexe 1.

Le modèle CycleauPE permet d'obtenir des débits naturels. Par contre, il nécessite un calage de ses paramètres de fonctionnement, indispensable à la bonne modélisation des débits naturels.

La simulation des débits de la Charente amont à Chanier (Beillant) s'est appuyée sur les débits de la Charente à Vindelle et de la Touvre à Foulpouagne, complétés par les apports du bassin versant intermédiaire.

Pour modéliser les débits de la Charente à l'estuaire, il est fait l'hypothèse que le bassin versant de la Charente aval et ses affluents a un fonctionnement hydrologique proche du bassin versant de la Boutonne aval, seul bassin versant aval pour lequel des mesures de débit sont disponibles. Les paramètres de calages retenus pour modéliser les apports de la Boutonne entre Moulin de Chatre et Carillon ont donc été retenus pour modéliser le bassin versant aval.

Le détail de la reconstitution des débits naturels est présenté dans l'étude sur la « Reconstitution des débits naturels de la Charente – Période 1970-2007 ».

3. Modèle d'impact : reconstitution des débits « historiques »

Le modèle d'impact hydrologique a été construit et utilisé pour la mise en place des Plans de Gestion d'Étiage. Il est ici utilisé dans sa fonction "Influence sur les débits naturels" issue de la modélisation CycleauPE. Il nécessite une bonne connaissance des influences anthropiques à la fois spatiales (localisation des prélèvements) et temporelles (répartition au cours de la campagne et évolution historique sur l'ensemble de la période). Il est dépendant de la fiabilité de la reconstitution des débits naturels et des hypothèses prises en compte sur la simulation des prélèvements.

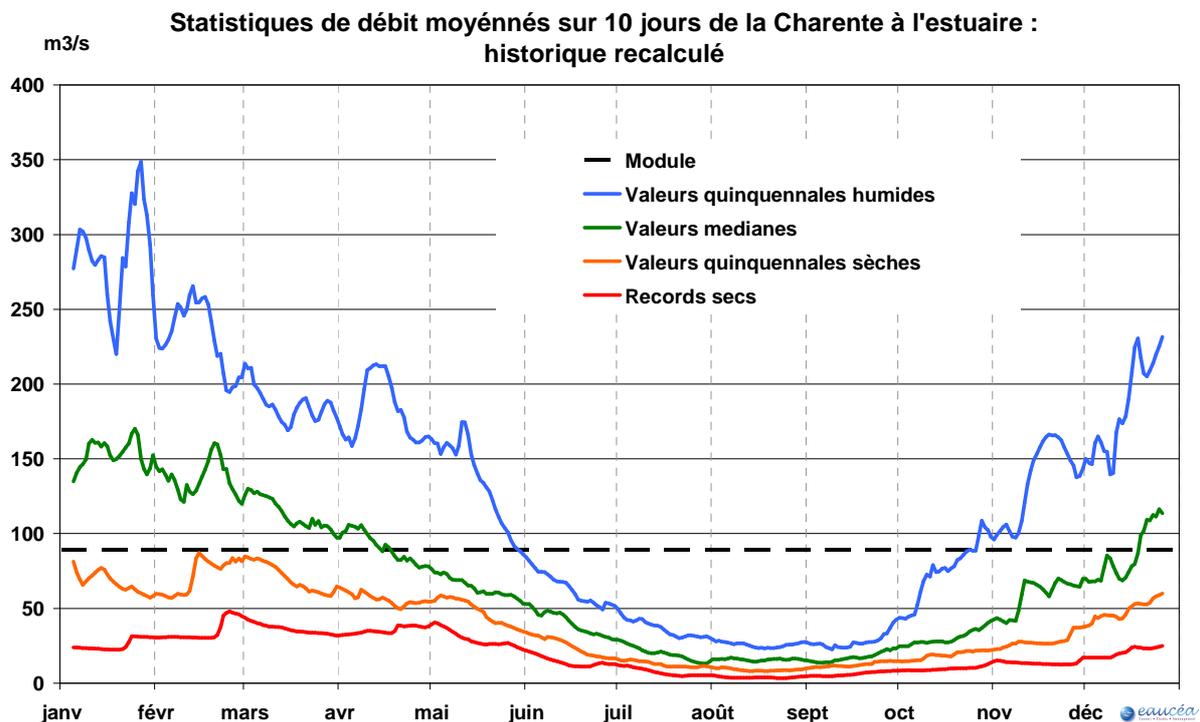
Le modèle reconstitue les chroniques de débits en influençant les débits naturels des prélèvements des différents usagers (AEP, industrie, agriculture, canaux) et des apports par lâchers de compensation ou de soutien d'étiage. Le détail du fonctionnement du modèle est reporté en annexe 2.

2.3 - Résultats

La reconstitution des débits « historiques » réalisés dans la présente étude apporte un nouvel éclairage sur les débits entrants à l'estuaire par rapport aux travaux réalisés par le PGE en 2004. Les résultats présentés ci après ont été produits :

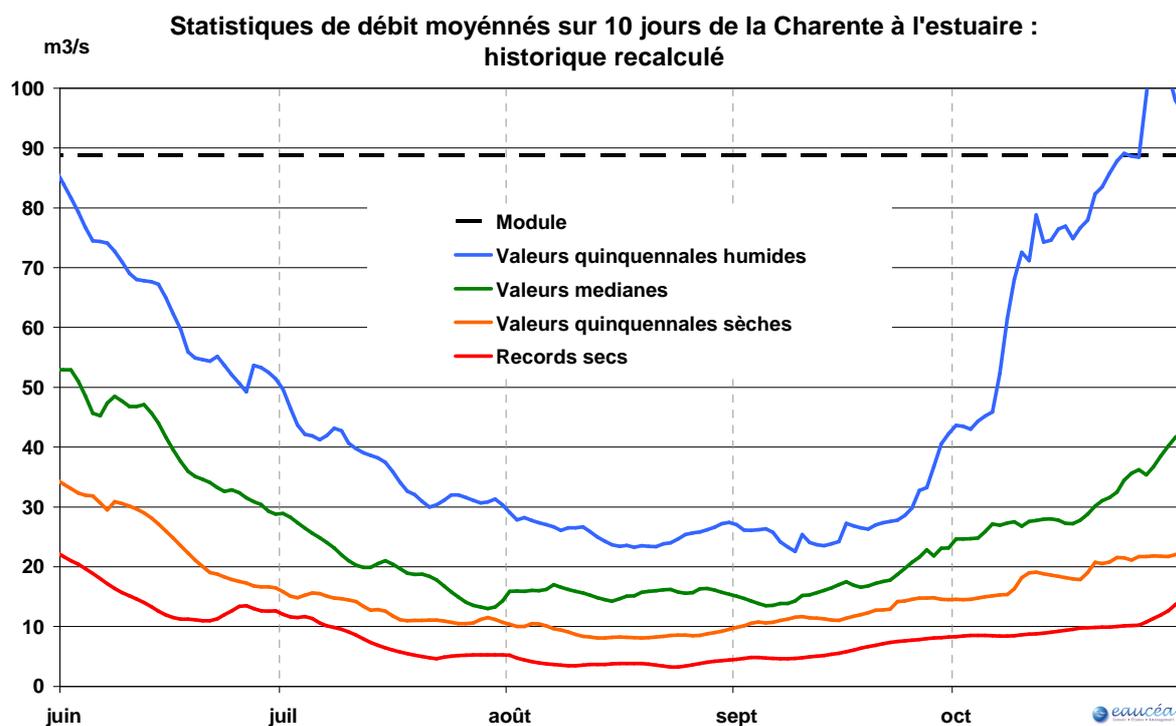
- Sur la période 1980-2007 (contre 1970-2001 dans le PGE) ;
- Avec une meilleure connaissance de la réalité des prélèvements ;
- Avec une meilleure compréhension de l'hydrologie aval (modèles Pluie – Débit, piézométrie).

Les graphiques ci après présentent les résultats de l'analyse statistique des débits « historiques » reconstitués moyennés sur 10 jours.



Le calcul des débits historiques à l'estuaire permet d'établir le module à 89 m³/s.

Zoom sur l'étiage



Le profil hydrologique de la Charente à l'estuaire obtenu est bien entendu comparable à celui qui avait été présenté dans les travaux du PGE. Cependant, quelques différences notables peuvent être soulignées sur les indicateurs d'étiage :

- Le VCN₁₀ 1/5 « historique » reconstitué de 6.7 m³/s est légèrement supérieur à celui qui avait été obtenu lors des travaux du PGE (5.7 m³/s) ;

m ³ /s	Median	Quinquennal
QMNA	14.5	8.7
VCN10	10.8	6.7
VCN30	13.0	7.9

Remarque : Avec un VCN10 1/5 naturel reconstitué de 15 m³/s (Etude de reconstitution des débits naturels visée précédemment), contre 12 m³/s dans les travaux du PGE. Les débits minimum d'étiage à l'estuaire étaient évalués à 15 m³/s dans les rapports de l'Ingénieur du dossier d'autorisation du barrage de Saint Savinen. Sous réserve de la fiabilité des mesures à cette époque, les résultats semblent cohérents, sachant que les prélèvements en Charente étaient vraisemblablement très limités avant 1960.

Rappelons que l'approche proposée dans la présente étude, bien que plus approfondie par rapport aux premiers travaux du PGE, n'est pas exempte d'incertitudes. Se pose toujours la question du calage du modèle pour la validation des résultats.

L'analyse des liens entre hydrologie amont et salinité dans l'estuaire, décrite ci après, permet d'apporter des éléments dans ce sens.

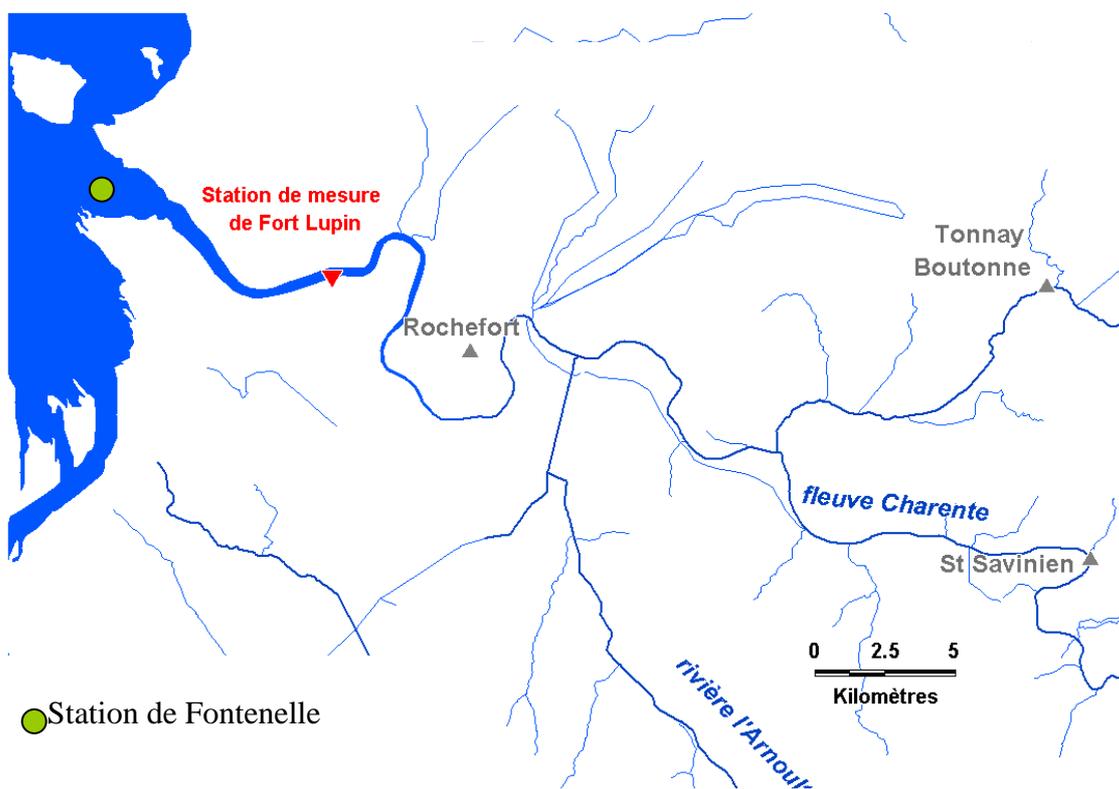
3 - Analyse des liens entre salinité et débits entrants à l'estuaire

La salinité dans l'estuaire de la Charente est influencée par deux phénomènes majeurs : les cycles de marée et le débit de la Charente à l'estuaire.

L'analyse des liens entre hydrologie et salinité représente un intérêt particulier. En effet, une fois désinfluencée de l'effet de la marée, la salinité représente un indicateur global des débits entrant à l'estuaire.

3.1 - Origine des données

La station retenue pour l'analyse est la station automatique de Fort Lupin qui mesure la salinité et la température depuis 1999 tous les quarts d'heure. La disponibilité de l'information est de l'ordre de 70 % ; l'absence de données est essentiellement concomitante aux périodes de vives eaux. Il semble que les épisodes de crue entraînent des arrêts des enregistrements durant quelques jours à quelques semaines.



Cette station présente l'avantage d'être en permanence sous influence océanique et continentale. Ainsi, aucun phénomène de seuil n'est observable sur les mesures enregistrées, contrairement à la précédente étude qui avait été réalisée avec l'Ifremer (Station Les Fontenelles, cf. carte ci-dessus).

Concernant l'influence de la marée, les données de hauteur d'eau théorique à l'Ile d'Aix du service de prédiction des marées du Shom ont été mobilisées.

Ces données, en terme de hauteur d'eau, intègrent à la fois le coefficient de marée (intensité) et la position dans le cycle de marée. Le fait d'avoir travaillé sur des hauteurs théoriques pose peu de contrainte étant donné l'influence des phénomènes de surcote éventuels (quelques dizaines de centimètres), par rapport au marnage, de l'ordre de 4 mètres.

Les données théoriques à l'Ile d'Aix permettent de retranscrire l'intensité de marée dans l'estuaire à Fort Lupin, sachant qu'un déphasage de l'onde de marée a été pris en compte (+ 2 heures).

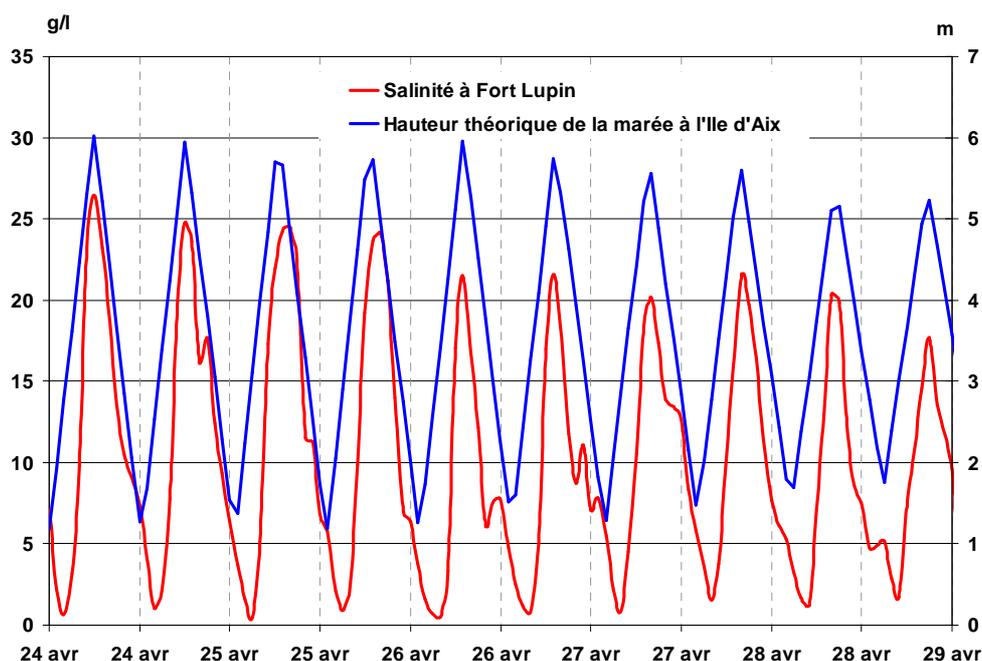
3.2 - Analyse des corrélations entre débit amont et salinité

Afin d'évaluer l'influence des débits amont sur la salinité, l'approche retenue a été :

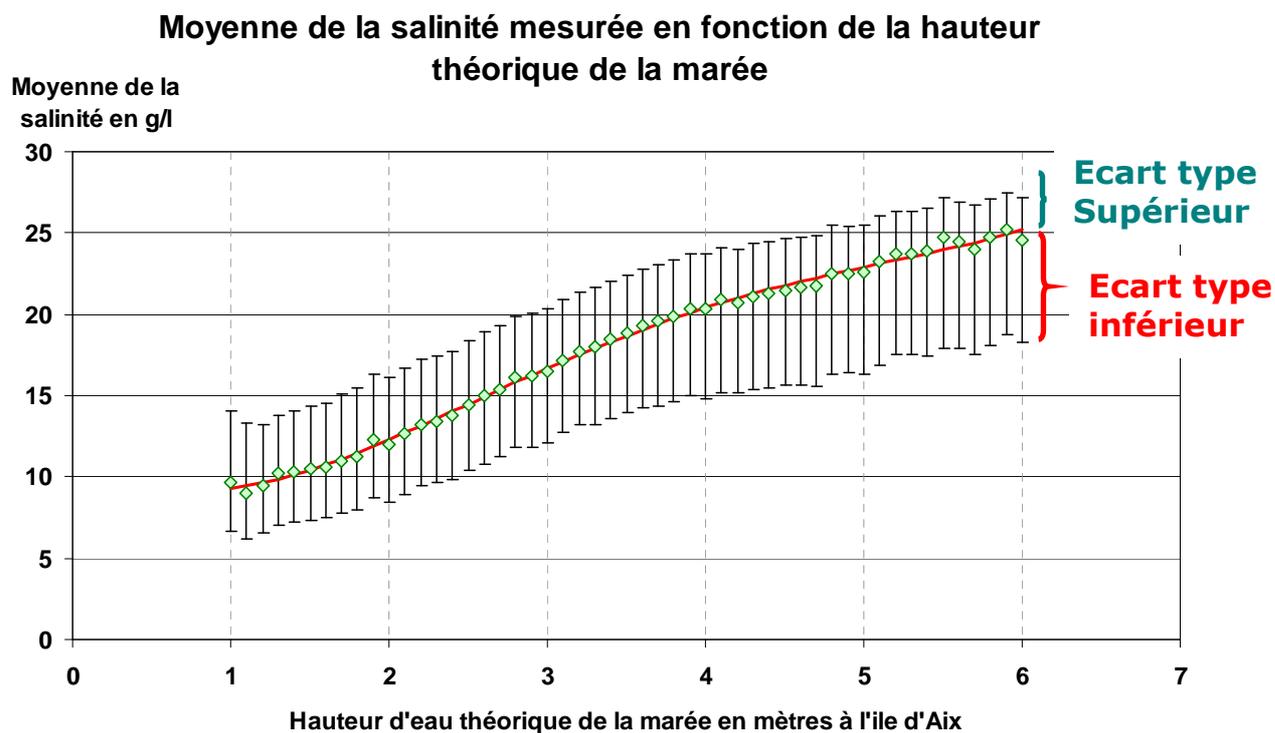
- Dans un premier temps, d'évaluer les corrélations entre hauteur d'eau et salinité moyenne dans l'estuaire ;
- Puis dans un deuxième temps, d'évaluer l'écart de la salinité mesurée à la salinité théorique issue de la corrélation visée ci-avant afin d'isoler l'influence du débit.

Le graphique suivant illustre tout d'abord la forte corrélation entre les profils de salinité et de hauteur d'eau.

La hauteur d'eau est donc prise comme un facteur de premier degré pour simuler la salinité dans l'estuaire.



Le graphique suivant présente l'analyse de la concentration moyenne en sel en fonction de la hauteur d'eau.



La comparaison de la moyenne de la salinité mesurée en fonction de la hauteur théorique de la marée à l'île d'Aix permet d'établir une bonne corrélation.

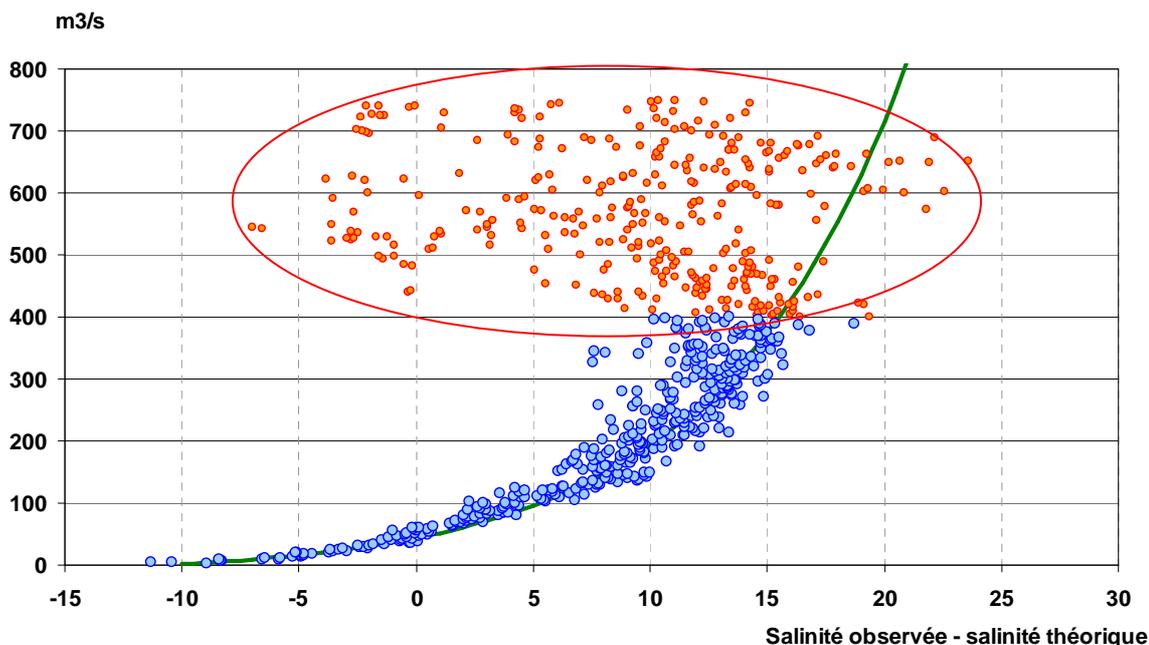
Cette première relation permet d'établir un niveau théorique de salinité (S_T) en fonction de la hauteur d'eau. On peut ainsi écrire :

$$S_T = 0,065.H^4 - H^3 + 5,1.H^2 - 6,2.H + 11,4$$

On constate toutefois une forte variabilité de la salinité pour une même hauteur d'eau théorique. En effet, étant mesurée dans l'estuaire, la salinité à Fort Lupin est fortement dépendante des débits de la Charente.

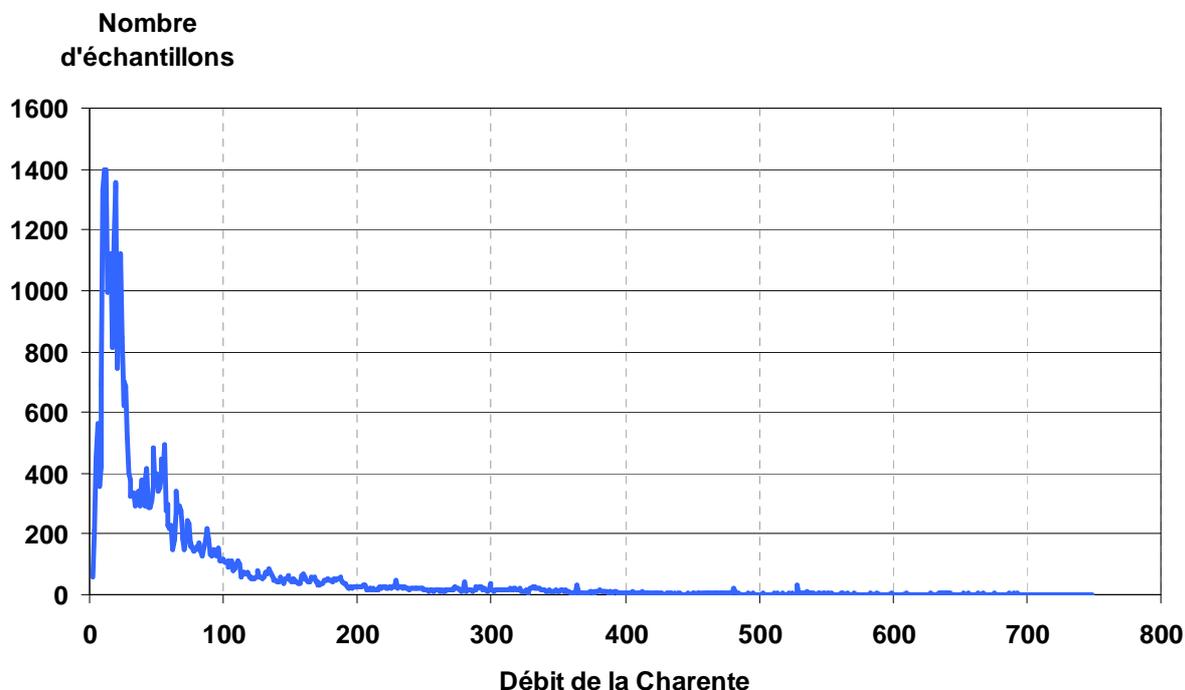
Il est proposé d'étudier l'écart moyen entre la salinité mesurée et salinité théorique en fonction du débit de la Charente.

Le graphique suivant présente les résultats de l'analyse sur l'ensemble de la période 1999-2008 au pas de temps horaire. L'écart entre salinité mesurée et salinité théorique semble être bien corrélé avec les débits de la Charente. On constate toutefois une divergence de la corrélation pour les valeurs élevées de débit.



Cet écart s'explique par le fait que très peu de données sont disponibles en période de fort débit : arrêts fréquents du capteur après des crues). Ainsi, la moyenne de l'écart n'est calculée qu'avec très peu de valeurs. Par ailleurs l'impact de la marée s'atténue sous l'effet hydrologique de la crue.

Le graphique suivant présente la répartition du nombre d'échantillons en fonction du débit de la Charente.



Les valeurs de différentiel de salinité sur les plages de débits élevés (points orange du graphique ci avant) ne sont donc pas prises en compte. Seuls les points disposant d'un nombre suffisant de mesures (points bleus) sont pris en compte pour la corrélation, sachant que la corrélation est prolongée pour les valeurs élevées de débit.

On obtient ainsi une relation entre le débit de la Charente (Q) et le différentiel de salinité (= différence entre salinité mesurée (S_M) et salinité théorique (S_T)).

$$Q = 60 \cdot \text{EXP} ((S_T - S_M) * 0,125) - 16$$

Les débits de la Charente à l'estuaire sont ainsi simulés à partir des données de salinité et de hauteur de marée théorique à l'Ile D'Aix au pas de temps horaire et moyennés sur cinq jours consécutifs.

3.3 - Résultats : reconstitution des débits « historiques » à partir de la salinité

Les graphiques suivants présentent de 1999 à 2007, les résultats de la simulation des débits à partir de la salinité («Débits simulés par la salinité»), comparés à la reconstitution des débits à partir des stations de débit et du modèle pluie - débit («Débits reconstitués par l'hydrologie»). Les performances du modèle sont calculées à l'aide du coefficient de Nash :

$$Nash = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Q_{sim} - Q_{mes})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{mes} - \overline{Q_{mes}})^2} \right]$$

Le coefficient vaut 100 % lorsque les simulations correspondent parfaitement aux mesures. Il peut également être négatif : ceci indique que le modèle est moins performant qu'une simulation égale en tous points à la moyenne des mesures. A noter que, lorsque les variations naturelles sont importantes, cas fréquent en hydrologie, le terme au dénominateur est élevé et a tendance à réduire l'impact d'une erreur relative de la simulation (terme au numérateur).

Les résultats sont globalement satisfaisants, même si des écarts significatifs peuvent apparaître entre les deux méthodes.

Ces écarts peuvent être liés pour la première méthode à des problèmes de reconstitution de débits via la modélisation pluie-débit sur les événements de crues ou à des problèmes d'évaluation de l'impact des usages préleveurs via le modèle d'impact.

On note également une série de problèmes récurrents, pour l'approche par la salinité, qui sont liés à la fiabilité de la mesure de salinité suite à des événements de crue.

3.4 - Enseignements de la comparaison des deux approches sur les débits de la Charente à l'estuaire

Le travail effectué a permis de mettre en évidence les relations entre débit estuarien, niveau de marée et salinité dans l'estuaire. Il a également montré qu'il est possible d'évaluer les débits de l'estuaire par une mesure de salinité.

Deux méthodes sont donc aujourd'hui disponibles pour apprécier les débits d'eau douce à l'estuaire : une approche par modélisation hydrologique et une approche par mesure directe dans l'estuaire et interprétation de la donnée. S'il est difficile de statuer sur la plus « réaliste » des deux approches, elles convergent suffisamment pour que l'on puisse s'appuyer dessus pour les analyses hydrologiques. Ces méthodes permettent aujourd'hui d'encadrer la valeur du débit moyen journalier à l'estuaire avec une précision de l'ordre de quelques mètres cube seconde sur les valeurs d'étiage.

La modélisation de l'hydrologie aval par le modèle pluie-débit a permis d'améliorer la connaissance sur les apports en eau à l'estuaire, mais des incertitudes persistent sur la prise en compte des prélèvements. En effet, les volumes prélevés sur le bassin la Charente sont bien connus mais les régimes de prélèvements au sein de l'année sont encore très mal connus. L'amélioration des simulations devra nécessairement passer par une amélioration de la métrologie sur les régimes de prélèvements.

Sur l'ensemble des mesures de salinité, les chroniques sont globalement bien renseignées et apportent des éléments de compréhension intéressants (exemple de 2005). Certains artefacts sont toutefois à noter et entraînent des erreurs de simulation importantes. La fiabilisation de la mesure de salinité est donc un enjeu pour renforcer l'évaluation des débits à l'estuaire. La mise en place de nouvelles stations de mesure en continu de la salinité en amont et en aval permettrait une validation des données et mieux connaître l'évolution du gradient de salinité et les déplacements de la masse d'eau saumâtre dans l'estuaire.

Annexe 1 : analyse détaillée des simulations

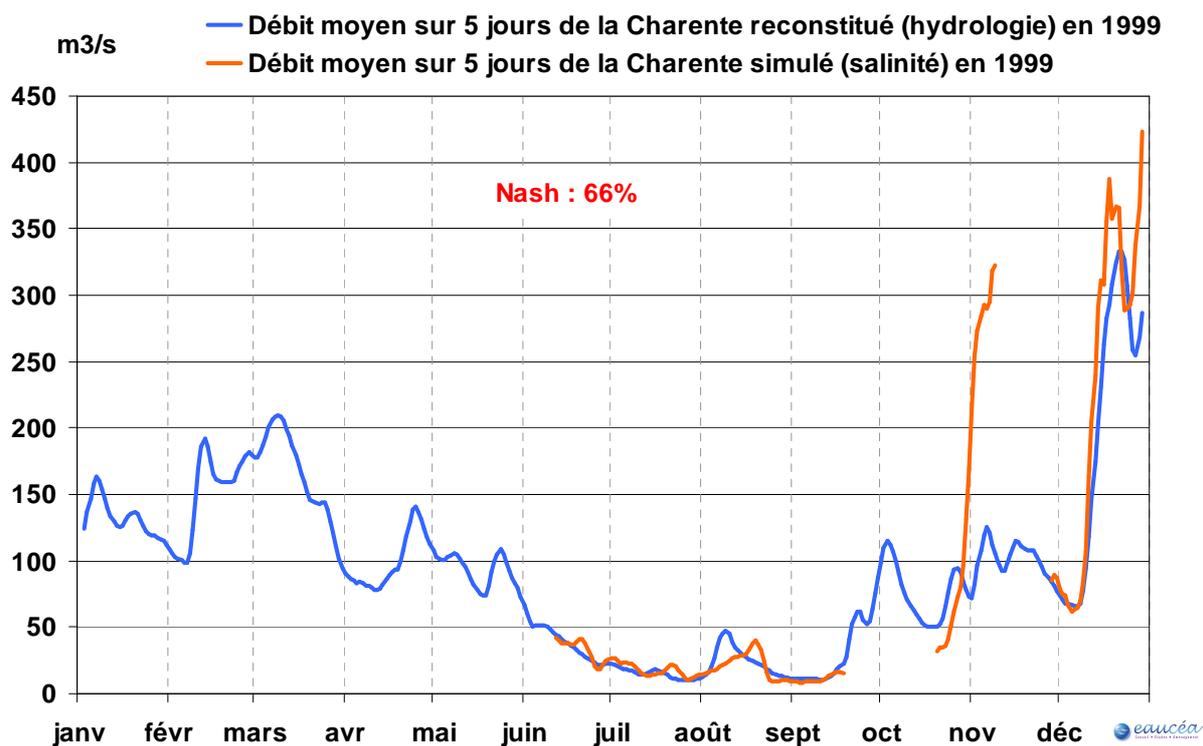
Problèmes de simulation d'évènements de crue avec l'approche par la salinité : exemple des années 1999, 2000 et 2004

En 1999, 2000 et 2004 on observe tout d'abord une très forte concordance des résultats des deux approches d'évaluation des débits à l'estuaire, aussi bien à l'étiage qu'en hautes eaux, confortant les résultats des simulations (cf. graphique en pages suivantes).

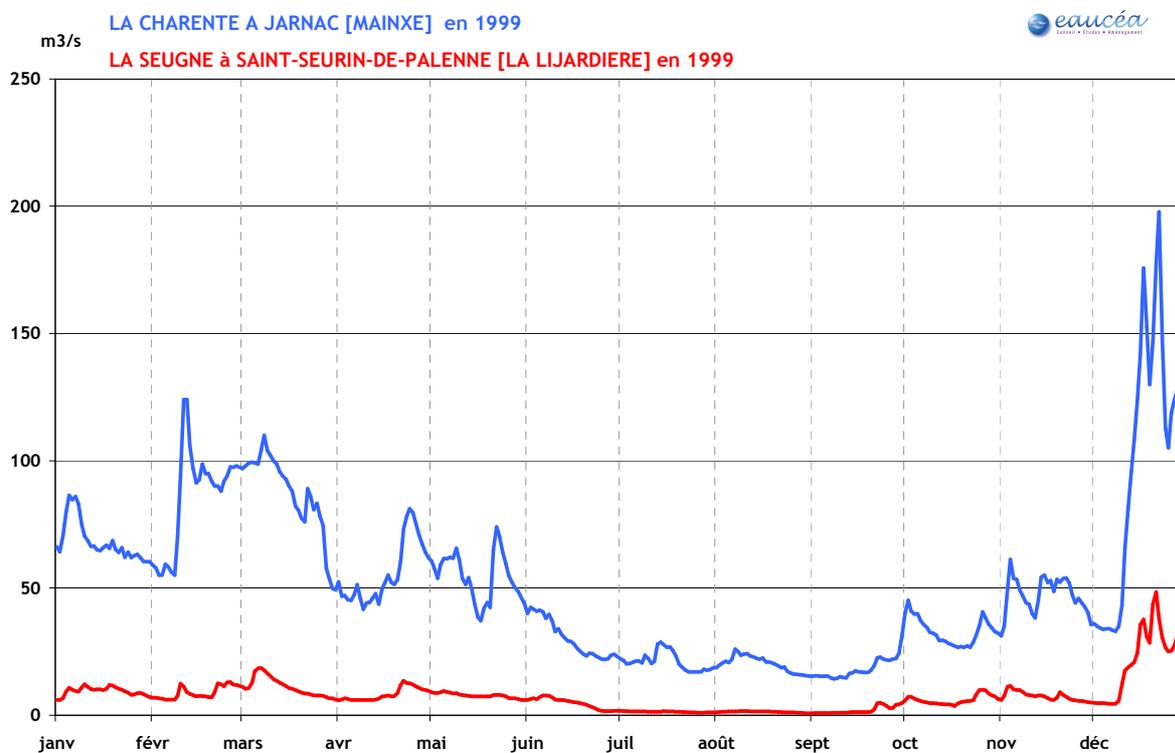
On observe cependant ponctuellement des écarts importants avec par exemple la simulation de crue (= forte dessalure) avec l'approche par la salinité qui n'a pas de traduction hydrométrique sur le reste du bassin versant. Ces écarts semblent liés à un problème de dérive temporaire du capteur sur la salinité.

La modélisation CyclEauPE semble donc mieux retranscrire les débits amont sur ce type d'événements.

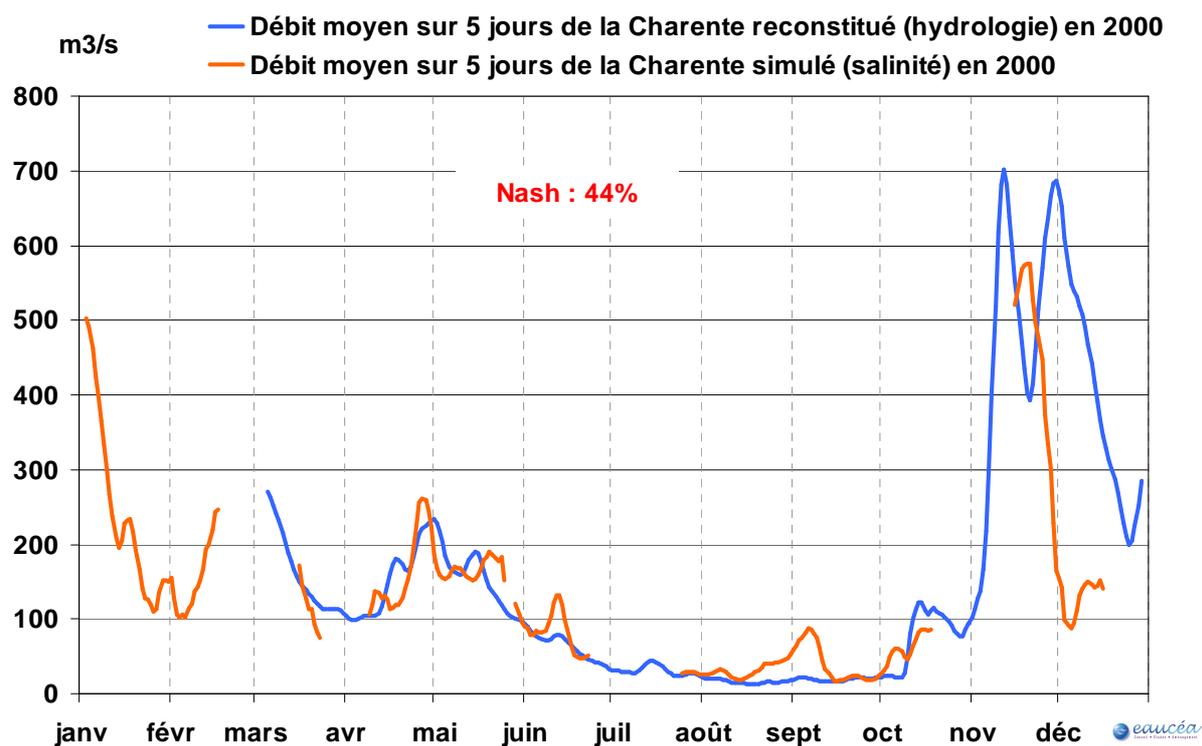
Résultat des simulations pour l'année 1999



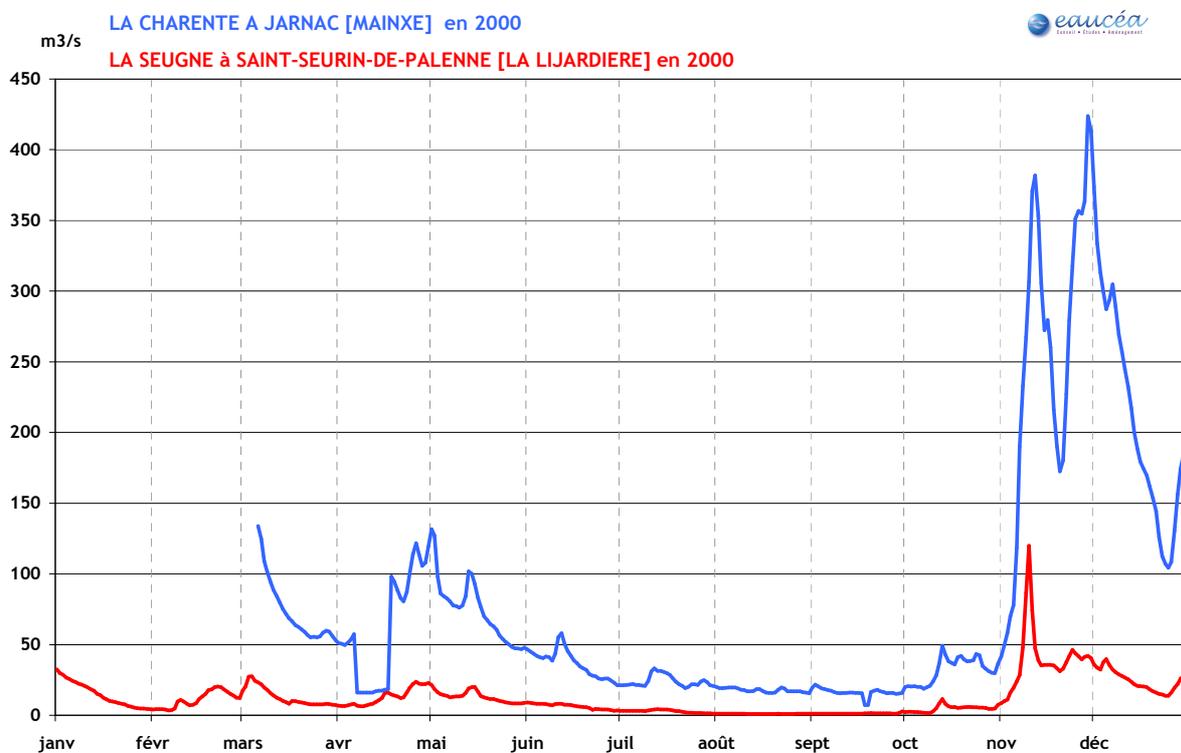
Chroniques de débits mesurés de la Charente et de la Seugne en 1999



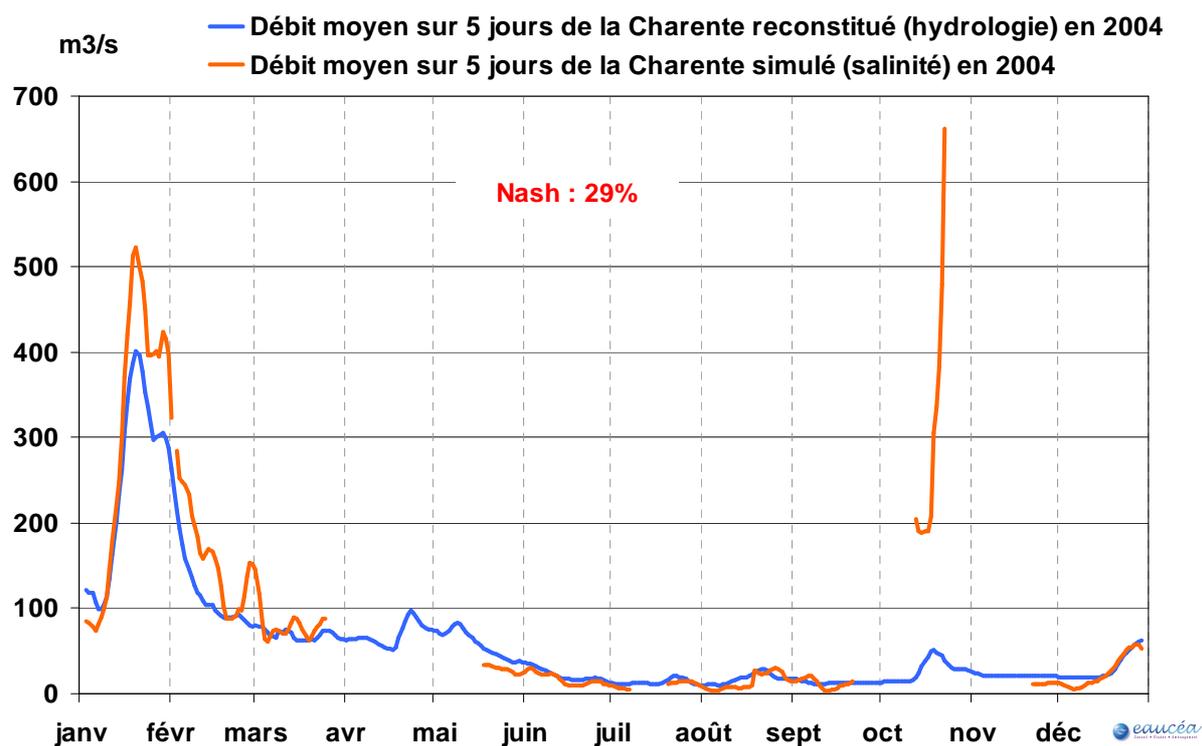
Résultat des simulations pour l'année 2000



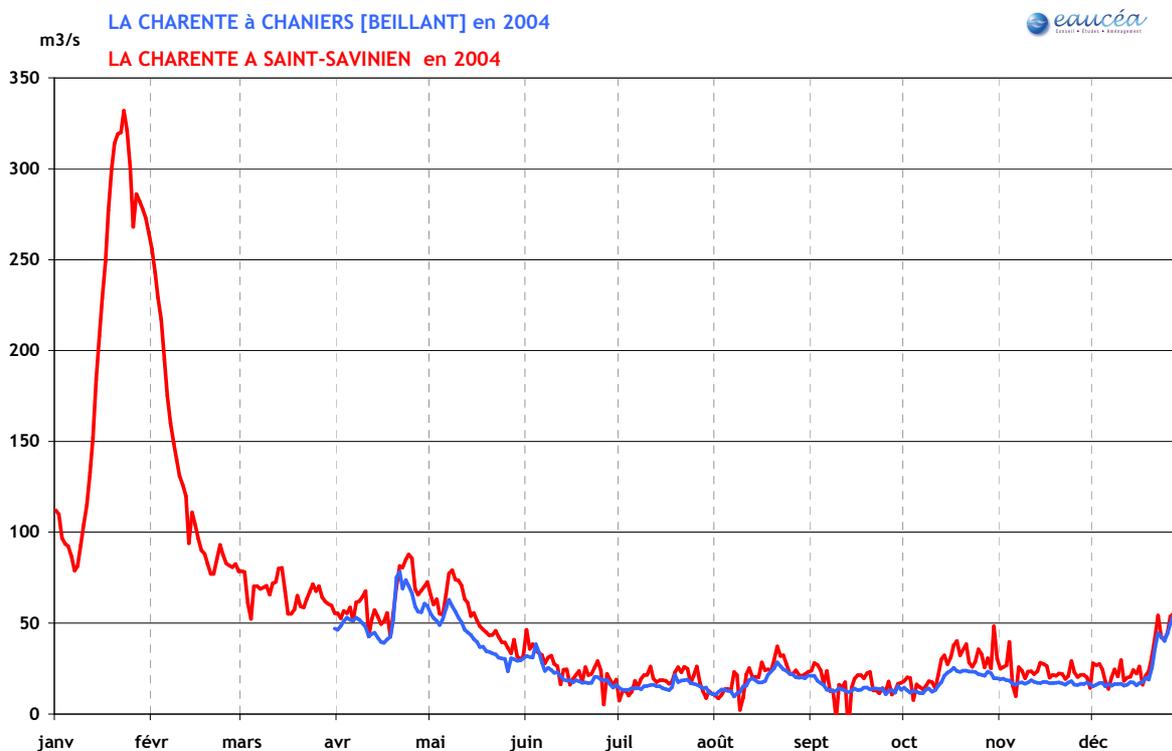
Chroniques de débits mesurés de la Charente et de la Seugne en 2000



Résultat des simulations pour l'année 2004



Chroniques de débits mesurés sur deux stations de la Charente en 2004



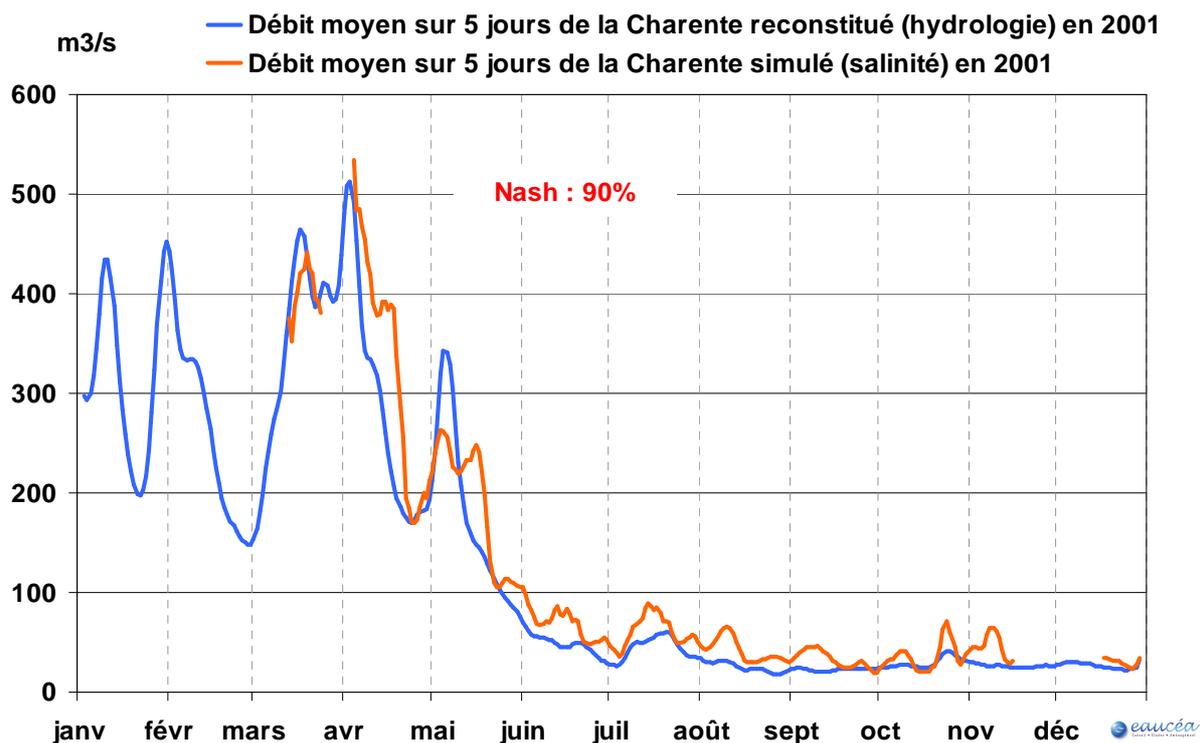
Écarts de simulation sur les débits d'étiage : exemple des années 2001, 2003 et 2005

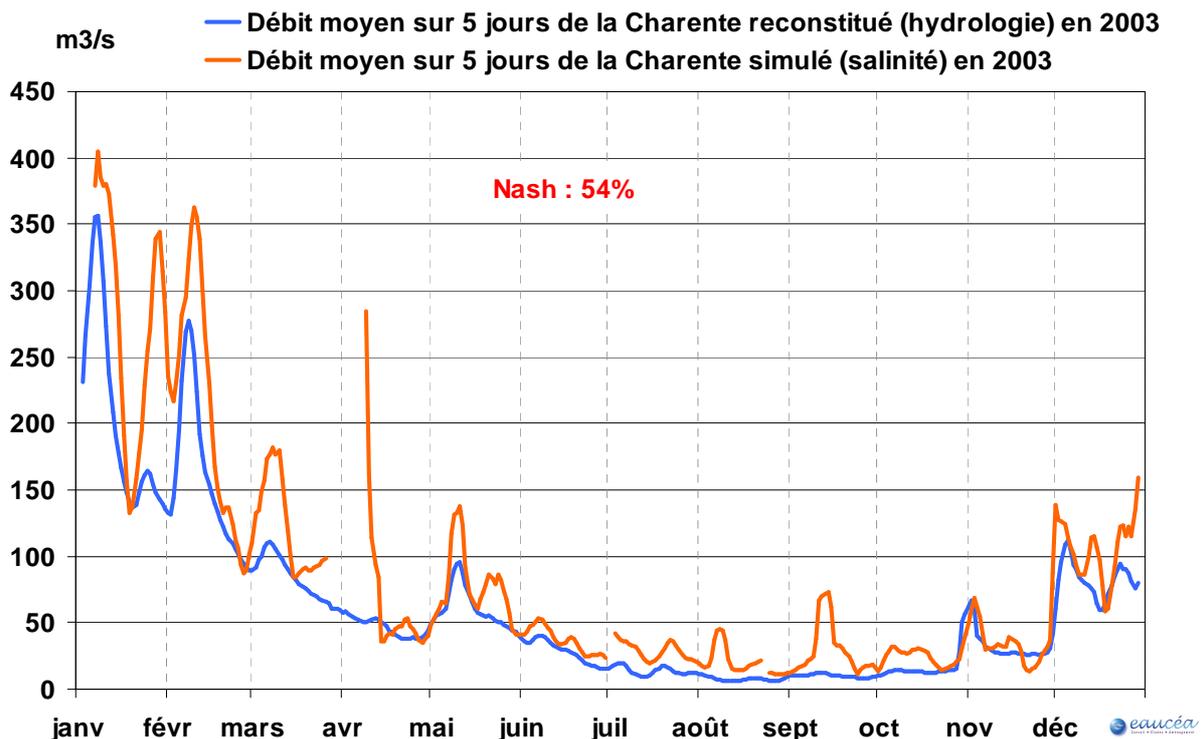
La simulation des faibles débits est sensible aux erreurs d'évaluation entre hauteur d'eau théorique et réelle ainsi qu'à une erreur de mesure de salinité. En effet, dans les gammes de débits un écart de 1 m³/s représente une erreur de 10 %.

Les simulations des années 2001 et 2003 présentent un écart sur les valeurs à l'étiage. Dans ces deux cas la modélisation CycleauPE donne des valeurs plus faibles que la modélisation à partir de la salinité.

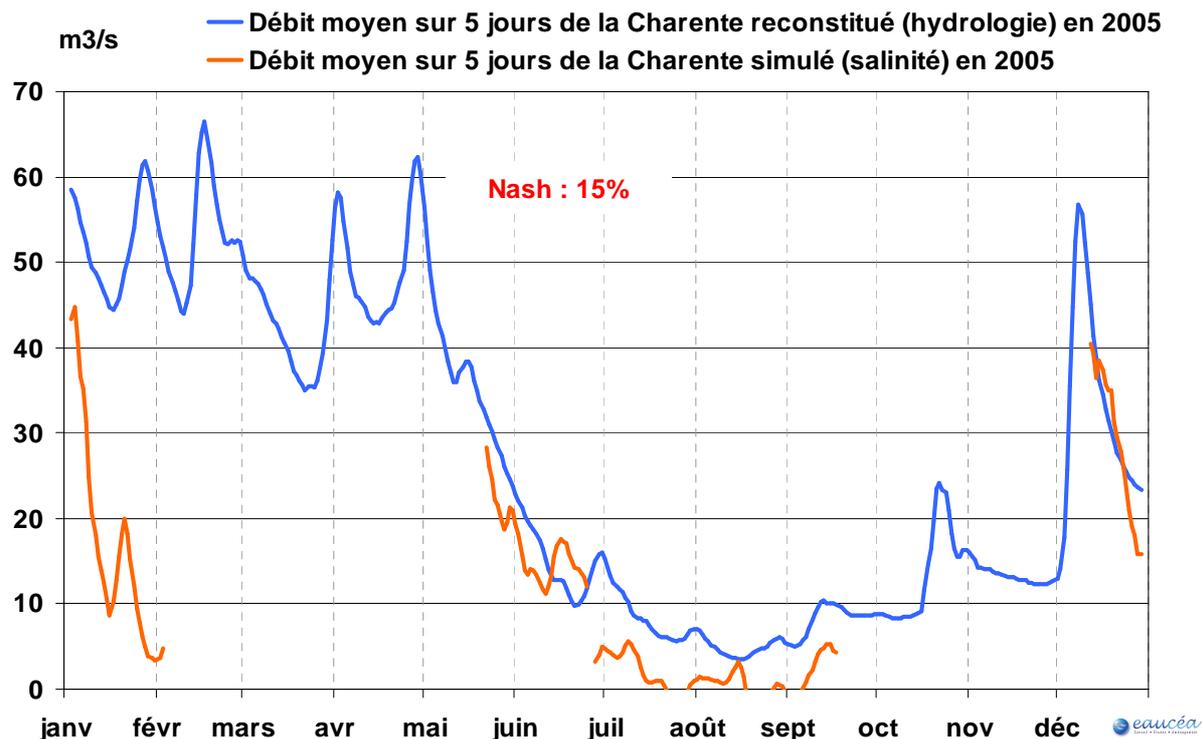
Pour l'année 2001 la chronique de salinité mesurée est relativement complète et semble fiable. L'écart peut être lié à la reconstitution CycleauPE, notamment l'évaluation des prélèvements qui peut présenter des écarts par rapport aux pratiques réelles.

Pour l'année 2003, on constate quelques manques récurrents dans la chronique qui explique en partie la différence entre les résultats des deux simulations.

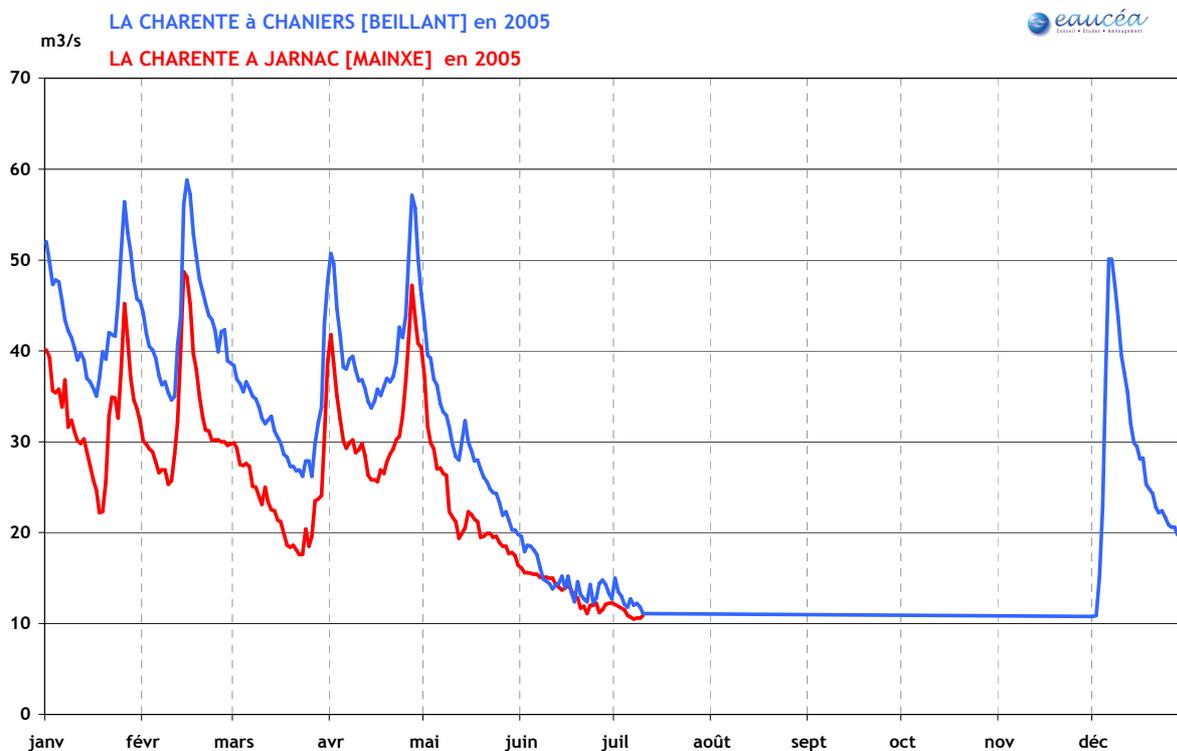




Concernant les simulations de 2005, il est difficile de statuer sur le résultat le plus fiable à l'étiage, l'écart étant de l'ordre de 5 m³/s. Ce différentiel peut être imputable aussi bien à l'évaluation des prélèvements réels à cette période qu'à la fiabilité de la modélisation à partir de la salinité dans les valeurs extrêmes. A noter que la simulation par la salinité donne des débits nuls au cours de l'année 2005. Ces valeurs ne sont toutefois pas étonnantes étant donné que l'année 2005 était une année avec une hydrologie d'étiage de l'ordre d'une année cinquantennale sèche.



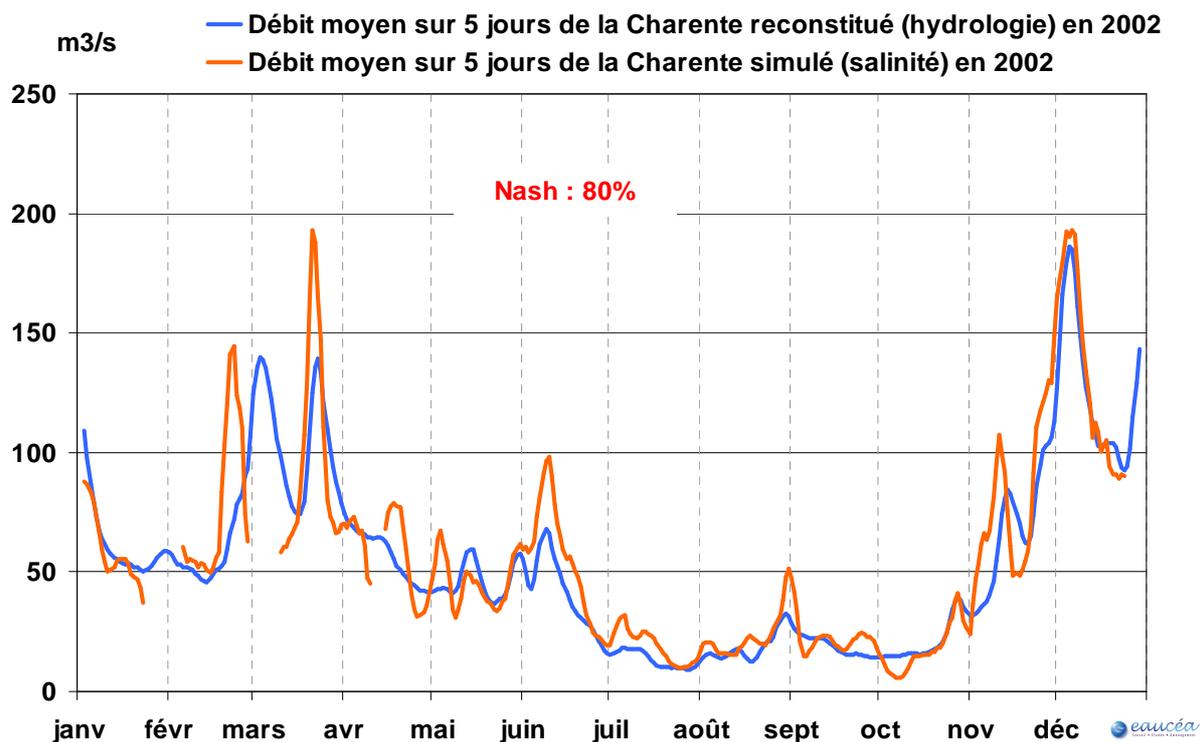
On observe également une différence notable au mois de janvier. Les débits obtenus à partir la simulation réalisée avec la salinité chutent, or l'hydrométrie enregistrée à cette période montre que les débits se situent bien autour des débits simulés avec CycleauPE.

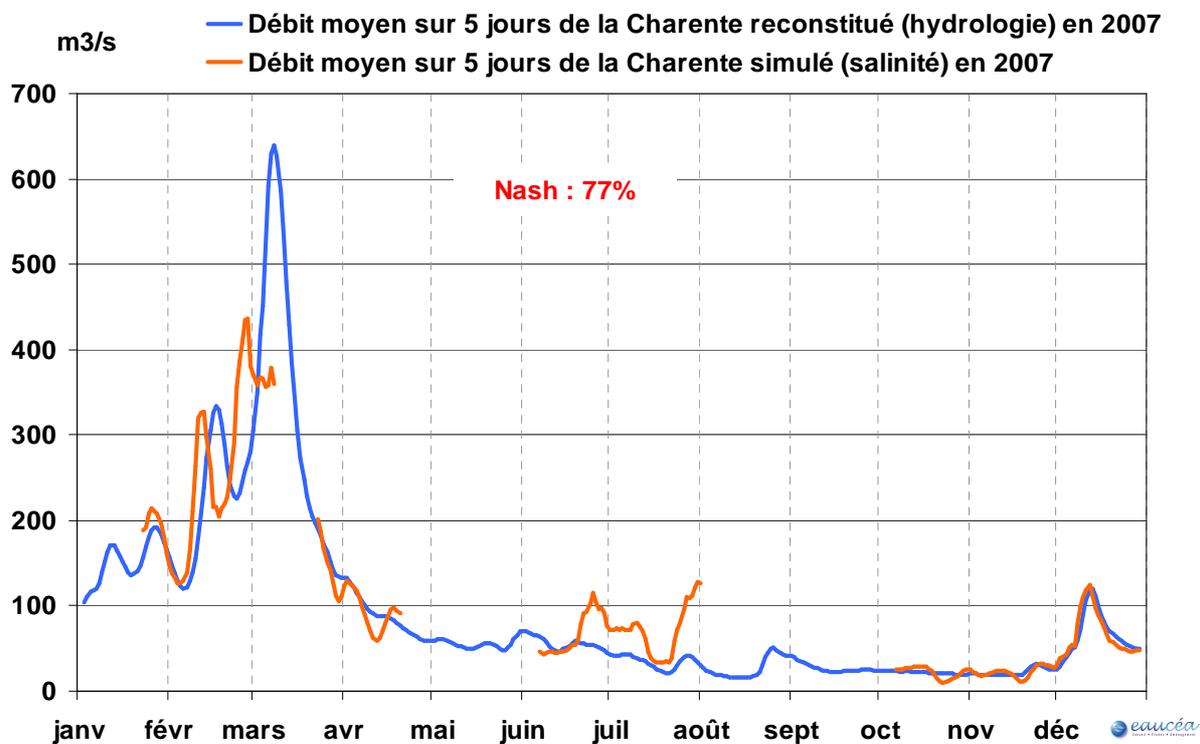
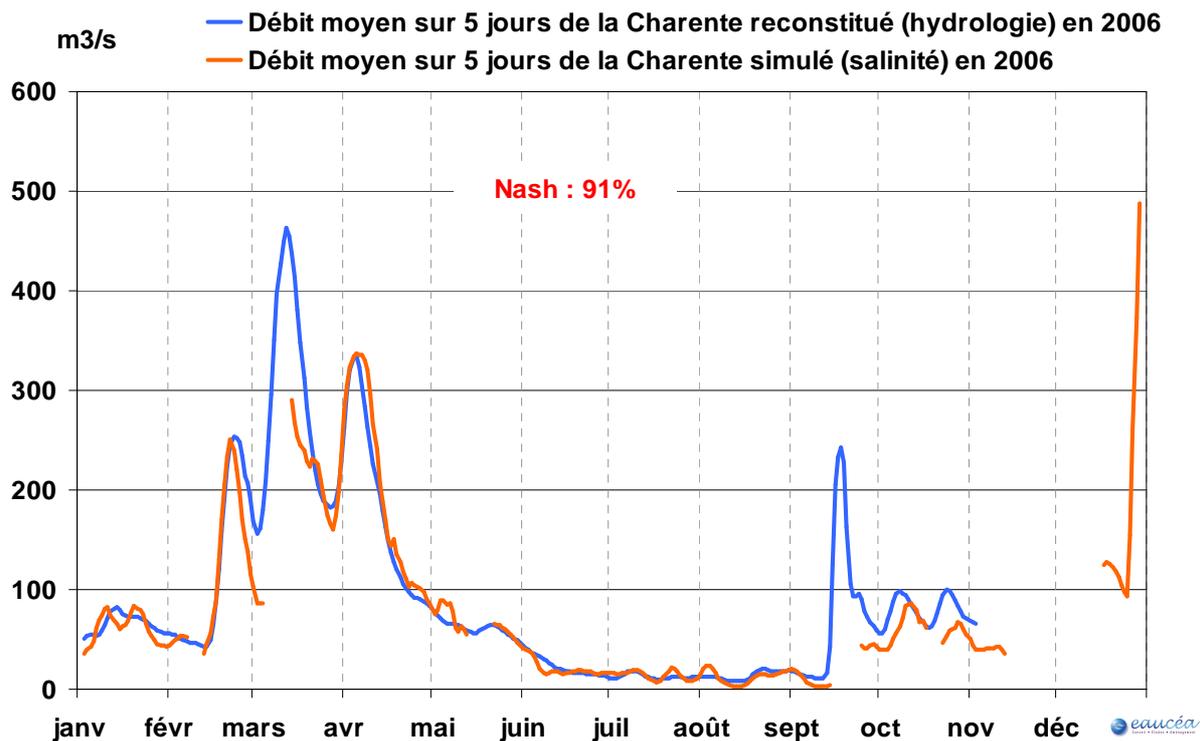


Simulations concordantes sur l'ensemble du cycle annuel : exemple des années 2002, 2006 et 2007

Malgré les écarts de simulation présentés ci avant, les résultats sont globalement très concordants, comme l'illustrent les simulations des années 2002, 2006 et 2007.

Sur l'ensemble de la chronique 1999-2007, hors événements «douteux» retranscrits par la modélisation salinité, l'indicateur Nash est 85%. La valeur de cet indicateur de corrélation atteste de la similitude des résultats entre les deux approches.





Annexe 2 : Description du modèle Pluie – Débit CycleauPE

CycleauPE : Pluie et ETP \Rightarrow Débit naturel

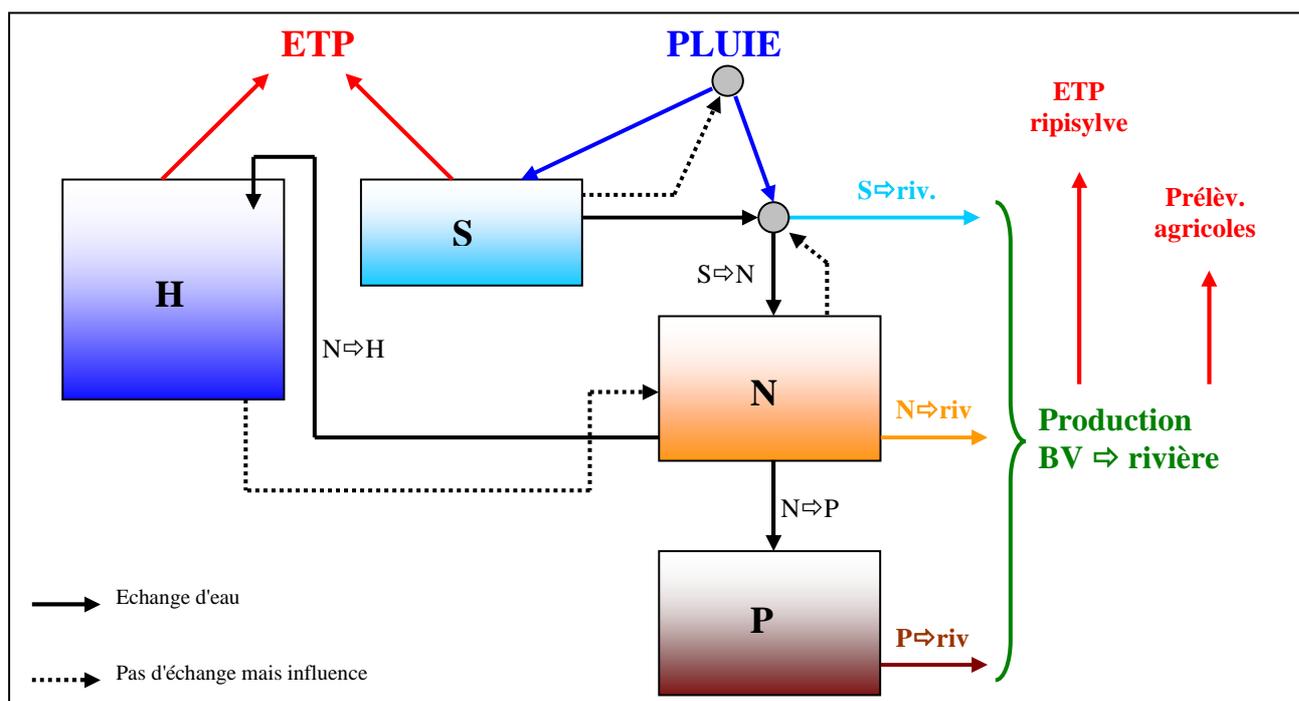
Le modèle hydrologique CycleauPE est une plateforme de simulation et de prévision des débits journaliers, exploitant plusieurs sous modèles, eux-mêmes en relation les uns avec les autres.

La particularité de CycleauPE par rapport à un modèle réservoir traditionnel est la très grande attention portée à l'étiage (période la plus complexe) et l'absence de relation "purement mathématique" sans lien avec un comportement physique identifiable. Cela en fait un puissant outil de communication auprès des usagers de la ressource (par exemple test de l'impact de restriction).

Le modèle comporte 4 réservoirs :

- Le réservoir superficiel (noté S), à capacité limitée (S_{max})
- Le réservoir non saturé (noté N), à capacité limitée (N_{max})
- Le réservoir "humidité" (noté H), à capacité limitée (H_{max}). Il représente le potentiel matriciel du sol, caractéristique de la capacité au champ du sol.
- Le réservoir profond saturé (noté P), sans limite de capacité

Ces réservoirs et leurs fonctionnements sont représentés schématiquement sur la figure suivante :



La production du bassin versant vers la rivière dépend dans ce modèle des précipitations (PLUIE) et de l'évapotranspiration potentielle (ETP), qui font réagir les différents réservoirs, qui eux-mêmes se vidangent, chacun à leur rythme, dans la rivière.

1. Dans le modèle, la pluie alimente directement le sol, la zone non saturée et le ruissellement. Les proportions de ces échanges (compris entre 0 et 1 pour chaque compartiment) sont en interaction et dépendent de leur état respectif à J-1. Lorsque la pluie s'abat sur le bassin, le taux de remplissage du réservoir S (rapport S/S_{max}) commande la part infiltrée dans S et la part qui passera directement dans N. Ainsi, un sol humide va favoriser l'alimentation de la zone non saturée. Si les apports pluviométriques sont supérieurs à la capacité S_{max} , il y a transfert. La part évaporée vient réduire le stock de S (La pluie précède l'évaporation dans le modèle).

2. En fonction du taux de remplissage de N (N/N_{max}), les apports à N (pluie et transfert depuis S) vont soit ruisseler (S-Riv), soit alimenter N (S-N). Ainsi, un fort remplissage de N favorisera le ruissellement direct.

3. Le réservoir N commande à la fois les écoulements retardés vers le cours d'eau (ressuyage, décrue, etc...) et les apports au réservoir profond P (recharge des nappes). Cette vidange de N vers P ou la rivière est régulée par la notion de capacité au champ (potentiel matriciel du sol = capacité du sol à retenir l'eau dans l'espace interstitiel grâce aux forces de capillarité). Ce potentiel va donc avoir tendance à soit retenir l'eau dans la zone non saturée si l'humidité du sol est faible, soit la laisser s'écouler si l'humidité est élevée.

C'est à ce niveau qu'intervient le réservoir H, caractéristique de la capacité au champ du sol. H est alimenté par N et vidangée par la part de l'ETP non satisfaite par le stock du sol (lorsque $S = 0$).

Les échanges depuis N vers P et Riv (N-Riv et N-P) sont proportionnels à H/H_{max} (plus l'humidité est forte, plus la vidange est importante). A l'inverse les échanges de N vers H (N-H) sont proportionnels à $1-H/H_{max}$ (plus l'humidité est faible, plus le transfert vers H est important).

Par ailleurs, l'intensité des échanges est aussi proportionnelle au stock de N. Plus le remplissage de N est élevé, plus les transferts d'eau vers H, P ou Riv sont importants. Enfin, la part relative des sorties d'eau depuis N est paramétrée par $KN-H$, $KN-P$ et $KN-Riv$.

4. La vidange du réservoir profond P assure le débit de base du cours d'eau, notamment à l'étiage. Cette vidange (P-Riv) est directement dépendante du remplissage de P. Elle suit la loi suivante, issue du modèle GR4'J:

$$Q = P \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{P}{P_{\max}} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\}$$

5. La production du bassin versant, apportée à la rivière, est donc l'addition des termes S-Riv, N-Riv et P-Riv.

Annexe 3 : Description du modèle d'impact

Débit mesuré = Débit naturel - consommations + apports

Les données de base du modèle d'impact sont les données de débits journaliers naturels reconstitués par la modélisation CycleauPE, ainsi que l'inventaire des usages consommateurs d'eau et des compensations éventuelles par les réservoirs. L'inventaire est réalisé à l'échelle de chaque unité de gestion.

Le modèle reconstitue les chroniques de débits en influençant les débits naturels des prélèvements des différents usagers (AEP, industrie, agriculture, canaux) et des apports par lâchers de compensation ou de soutien d'étiage. Les influences historiques sont comptées positives lorsqu'elles correspondent à une consommation et négatives lorsqu'elles correspondent à des apports d'eau.

Les calculs sont effectués au pas de temps journalier sur la période d'étiage (1^{er} juin-31 octobre).

Influence des prélèvements en nappe

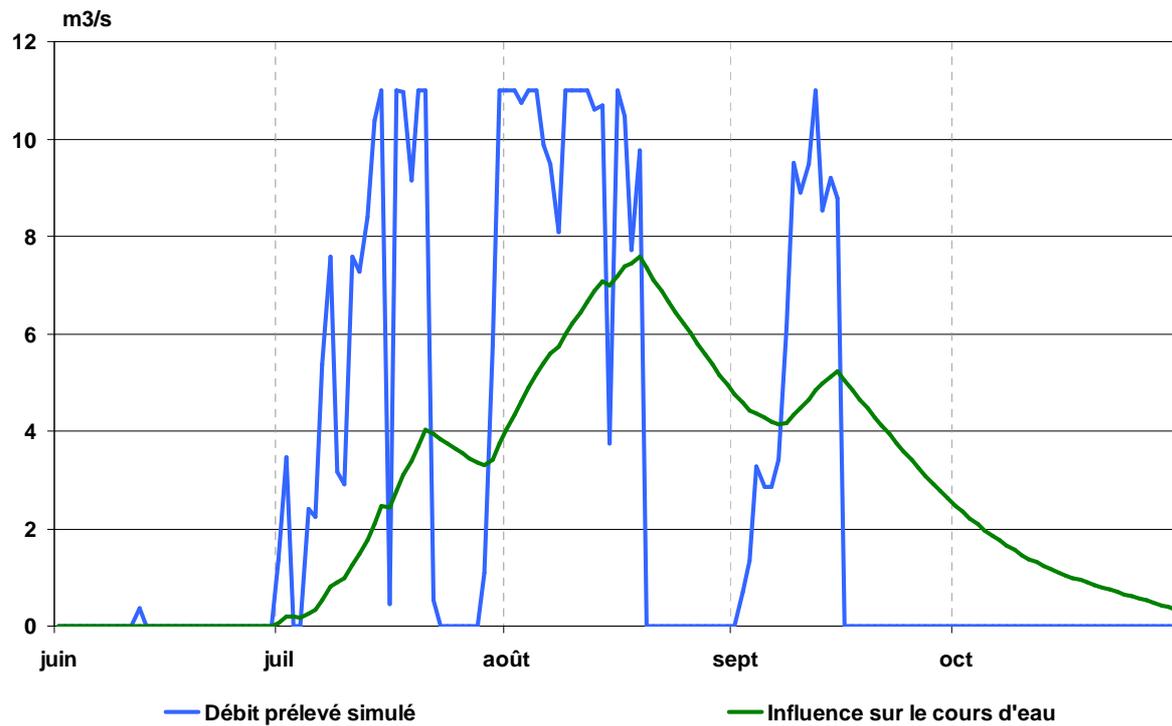
Les nappes superficielles drainées par la Charente et ses affluents sont fortement sollicitées en étiage, notamment pour les prélèvements d'irrigation.

L'impact de ces prélèvements souterrains sur la ressource superficielle a fait l'objet d'un traitement particulier dans la modélisation, pour prendre en compte l'effet retard induit par l'inertie de réaction de l'aquifère à une sollicitation de pompage. L'effet d'un prélèvement direct en rivière est pratiquement immédiat sur l'hydrogramme mesuré un peu plus en aval au droit de la station hydrométrique ; en revanche, l'effet d'un prélèvement en nappe alluviale aura un impact retardé et étalé dans le temps sur les débits de la rivière.

L'influence des prélèvements est plus ou moins retardée suivant l'éloignement du forage vis-à-vis du cours d'eau ainsi que des caractéristiques hydrogéologiques des aquifères. L'influence a été évaluée par unité hydrologique homogène. Elle prend en compte le tarissement des cours d'eau qui est fonction des caractéristiques aquifères du secteur considéré et est affinée par une expertise des chroniques de débits mesurés.

Pour un prélèvement constant, l'influence maximale s'établit en régime permanent au bout des 60 jours.

Impact des prélèvements en nappe sur le débit des cours d'eau



Dans le cas de prélèvements proches de la réalité, on constate bien l'effet retard et l'amortissement du débit de pointe des prélèvements. L'impact peut ainsi se faire sentir jusqu'au mois d'octobre.