

# Une procédure pour le calcul systématique des écoulements spécifiques à partir des débits

Gilles Billen & Sidonie Christophe

UMR Sisyphé 7619, UPMC-CNRS, [billen@ccr.jussieu.fr](mailto:billen@ccr.jussieu.fr)

1. Introduction .....	1
2. Règle empirique pour le calcul de la répartition de l'écoulement total entre écoulement de base et écoulement superficiel.....	2
3. Le modèle Hydrostrahler.....	3
4. Procédure de calage sur des séries pluriannuelles de débits.....	3
5. Conclusion.....	6
6. Bibliographie.....	6

## 1. Introduction

L'applicatif SENEQUE/Riverstrahler base sa représentation de l'hydrologie du réseau hydrographique sur la connaissance, pour chaque bassin et chaque axe, des deux composantes, superficielle et phréatique, de l'écoulement spécifique moyen décadaire (Billen et al, 1994, 2000 ; Ruelland, 2004 ; Ruelland et al., in press). La procédure proposée par défaut dans les versions antérieures de SENEQUE consiste dans le calcul de ces écoulements, à partir des données météorologiques de pluviométrie et d'évapotranspiration potentielle de l'année concernée, en faisant appel au modèle Hydrostrahler, codé dans la partie « préparation des fichiers de contraintes » de l'applicatif. Le modèle Hydrostrahler (Billen et al., 1994) (voir ci –après) est un modèle pluie-débit extrêmement simple, basé sur la prise en considération de 2 réservoirs d'eau dans le sol, l'un superficiel à renouvellement court, l'autre phréatique à renouvellement long. Les 4 paramètres de ce modèle (niveau de saturation du sol, taux d'infiltration, d'écoulement superficiel et d'écoulement phréatique) sont fixés à priori en fonction de la lithologie du bassin, dans le fichier paramètres « geol.cle » accessible à l'utilisateur, et paramétré grossièrement par défaut pour le bassin de la Seine.

Il se trouve que cette procédure génère souvent des débits peu conformes aux observations, ce qui pénalise lourdement la suite des simulations du modèle. La raison en est simple : elle a été révélée par les travaux sur l'hydrologie du bassin de la Seine menés avec le modèle MODCOU. L'inertie des aquifères du bassin est si considérable que le niveau du débit de base estival (étiage) est largement dépendant du 'passé' pluriannuel de l'hydrologie du bassin. Il est donc impossible de calculer correctement les débits d'une année, et particulièrement ses débits d'étiage, sans prendre en compte les conditions de plusieurs années antérieures. C'est donc moins le modèle Hydrostrahler lui-même qui est en cause, que l'impossibilité de l'initialiser correctement sans connaissance des conditions antérieures.

Pour pallier cette difficulté, qui représente aujourd'hui une faiblesse majeure du caractère prédictif de SENEQUE, la possibilité de faire appel à des fichiers précalculés de l'écoulement spécifique de l'année de simulation a été introduite dans l'applicatif dès 2002. C'est cette option qui a été mise en œuvre pour le calcul du scénario tendanciel 2015, basé sur l'hydrologie de l'année sèche 1996. La couche spatialisée d'écoulements spécifiques correspondante avait été générée à partir de l'exploitation d'un maximum de données de débits mesurés, en utilisant une procédure semi-empirique, basée sur des moyennes glissantes (Bacq et al., 2002). Cette procédure empirique n'est pas entièrement satisfaisante sur un plan conceptuel, et nous avons donc choisi de développer une méthode plus rigoureuse de calcul des écoulements spécifiques spatialisés à partir du calage des paramètres du modèle Hydrostrahler sur des séries pluriannuelles de débits mesurés en diverses stations du bassin.

L'objet de cette note est de décrire cette procédure, qui sera prochainement intégrée dans une interface conviviale compatible avec l'environnement de l'Applicatif SENEQUE. Après un bref rappel de la procédure utilisée précédemment, nous présentons rapidement les principes du modèle Hydrostrahler, puis la manière dont son calage peut être réalisé sur une série pluriannuelle de débits pour générer des écoulements superficiels et phréatiques en concordance avec les hypothèses de ce modèle.

## 2. Règle empirique pour le calcul de la répartition de l'écoulement total entre écoulement de base et écoulement superficiel

La procédure précédemment développée (Bacq et al., 2002), est basée sur la partition entre écoulement de base et écoulement superficiel de l'écoulement spécifique décadaire total, lui-même dérivé des observations de débit journalier disponibles aux différentes stations hydrologiques.

La procédure est la suivante, pour chaque bassin et chaque année hydrologique :

On repère tout d'abord la décade d'écoulement total minimum, et la valeur spécifique correspondant est pris comme seuil minimum d'écoulement de base (EcMin) pour toute l'année.

On calcule alors la moyenne mobile (sur 3 décades précédentes) du surplus d'écoulement spécifique par rapport à ce seuil (Eci(dec)). On lui affecte un coefficient f, censé représenter la part de débit de base dans ce débit. Ce coefficient f est défini arbitrairement en fonction de la nature lithologique du bassin, plus particulièrement de sa capacité d'infiltration.

$$f = \sum \alpha_i \cdot Cl_{geol_i}$$

où  $Cl_{geol_i}$  est la proportion surfacique du bassin appartenant à la classe lithologique i

et  $\alpha_i$  un coefficient relatif à cette classe lithologique. Typiquement, les valeurs retenues pour les grandes formations lithologiques du bassin de la Seine sont les suivantes :

Argiles et marnes, socle :	0.2
Calcaires :	0.4
Craie :	0.6

On calcule alors le débit de base pour chaque décade comme.

$$Ecb(dec) = EcMin + Eci(dec) * f$$

Si l'écoulement de base ainsi calculé dépasse l'écoulement total mesuré, il est limité à cette valeur :

$$\text{Si } Ecb(dec) > Ectot(dec) \text{ alors } Ecb(dec) = Ectot(dec)$$

L'écoulement superficiel (Ecs(dec)) est alors calculé comme la différence entre l'écoulement total de la décade concernée (Ectot(dec)) et l'écoulement de base calculé.

$$Ecs(dec) = Ectot(dec) - Ecb(dec)$$

La grande faiblesse de cette approche, qui a cependant fourni des résultats acceptables, est le caractère assez arbitraire des coefficients  $\alpha_i$  utilisés pour la partition du débit entre contribution superficielle et profonde. Le pas de temps de la moyenne mobile est lui aussi tout à fait arbitraire et ne peut rendre compte de manière rigoureuse de l'inertie des aquifères.

### 3. Le modèle Hydrostrahler

On a donc préféré revenir à la conceptualisation offerte par le modèle Hydrostrahler, mais en calant ses paramètres, en dehors de l'applicatif SENEQUE, sur des séries pluriannuelles de débits.

L'architecture d'Hydrostrahler s'organise comme indiqué en figure 1. C'est un modèle pluie débit utilisant en entrées la pluviométrie et l'évapotranspiration potentielle journalières, et calculant l'écoulement superficiel et de base. Il est toujours mis en œuvre au pas de temps journalier, même si, comme c'est le cas dans SENEQUE, ses résultats sont ensuite agrégés au niveau décadaire.

Le modèle décrit chaque bassin versant comme comportant deux réservoirs, un réservoir « SOL » et un réservoir « AQUIFERE ». Les précipitations (P) alimentent directement le réservoir SOL. L'évapotranspiration potentielle (ETP) s'exprime tant que le réservoir sol n'est pas épuisé. Si le niveau du réservoir sol dépasse un seuil de saturation (*Solsat*), l'excédent du SOL par rapport à *Solsat* alimente aussitôt un ruissellement superficiel. Sinon ce ruissellement est nul. Le réservoir SOL a deux autres sorties : l'une d'elles produit l'écoulement intermédiaire, prélevant une fraction *tecs* du niveau du réservoir SOL ; l'autre produit l'infiltration profonde, en prélevant de SOL une fraction *tinf*. L'infiltration alimente le réservoir AQUIFERE, qui produit l'écoulement de base, prélevant une fraction *ten* de son niveau de remplissage.. Les quatre paramètres cités (*Solsat*, niveau de saturation du sol ; *tecs*, taux d'écoulement du sol ; *tinf*, taux d'infiltration ; *ten*, taux d'écoulement de la nappe), sont à caler pour chaque bassin.

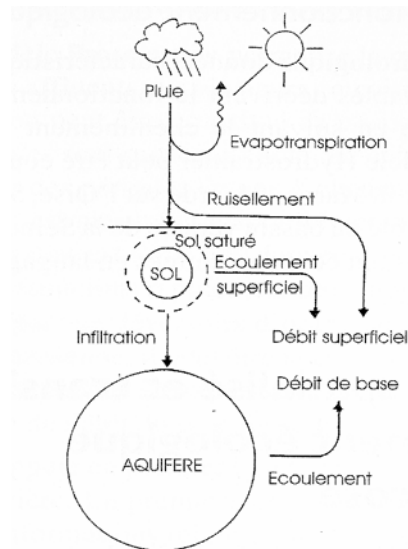


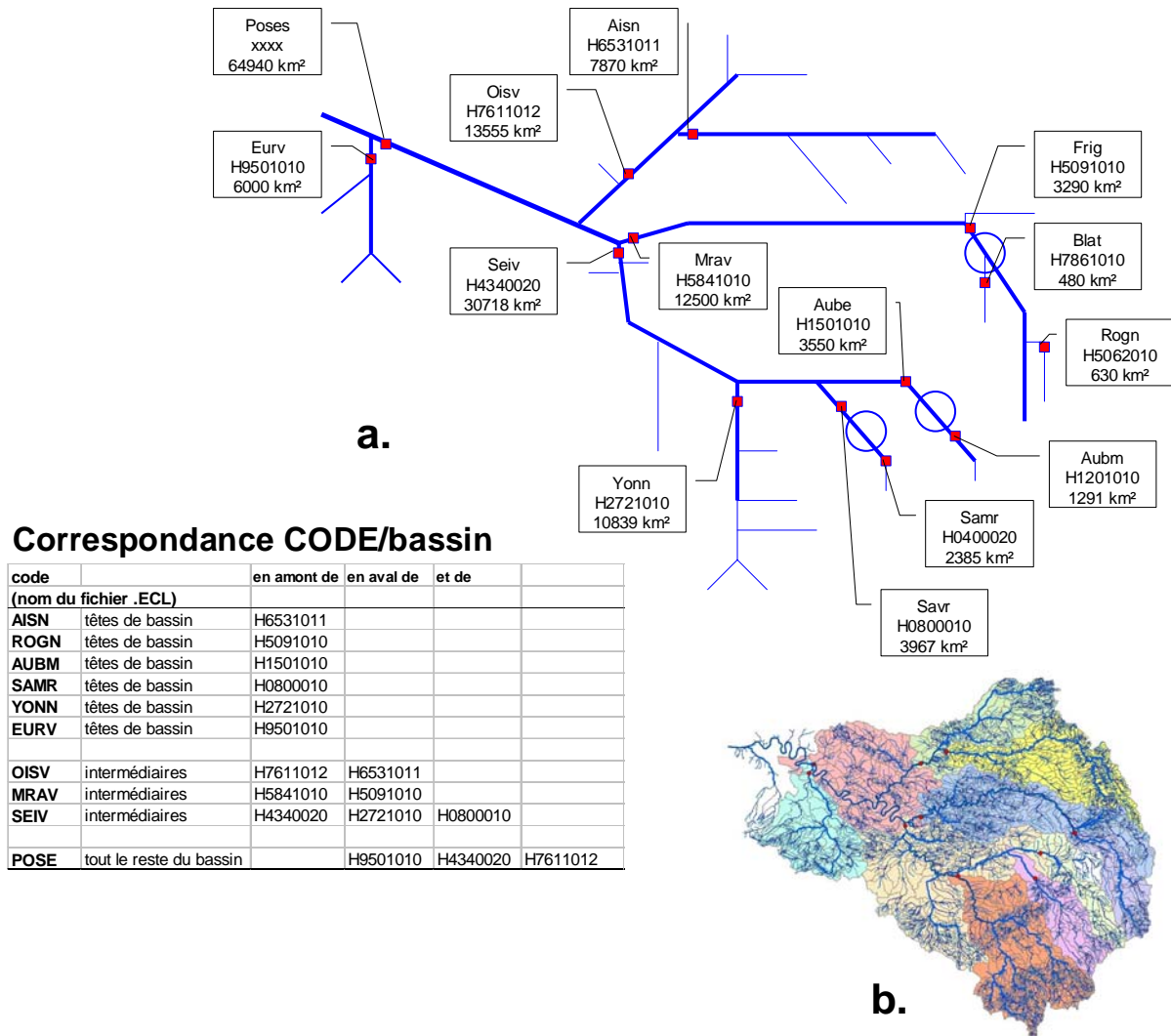
Figure 1: Schéma conceptuel du modèle Hydrostrahler.

### 4. Procédure de calage sur des séries pluriannuelles de débits

Une procédure générique a été mise au point pour le calage des 4 paramètres hydrologiques d'Hydrostrahler et le calcul des écoulements superficiels et phréatiques spatialisés, à partir de séries pluriannuelles de débits journaliers en diverses stations, et des données météorologiques correspondantes.

L'espace à couvrir est tout d'abord divisé en zones, représentant des portions de bassins délimitées chacune par une station aval et un certain nombre de stations amont. Ces zones peuvent représenter des sous-bassins de tête (définis seulement par une station aval), ou des portions aval de

bassins (délimités en amont par une ou plusieurs stations). La résolution spatiale de la couverture finale d'écoulements dépendra donc du choix de l'utilisateur ou de la disponibilité des données fiables de débits. Certains interbassins comportant des prises ou des restitution d'eau importantes (par exemple pour des barrages réservoirs) doivent être exclus de l'analyse. La figure 2 présente un exemple de division en zones pour le bassin de la Seine dans son ensemble, à une résolution relativement faible (zones de l'ordre de 5000 km<sup>2</sup>).



**Figure 2:** *a.* Division de l'espace du bassin de la Seine en zones hydrologiques pour le calcul des écoulements. Les zones marquées par un cercle sont celles correspondant à l'emplacement des prises et restitution d'eau des grands barrages réservoirs. Elles sont ignorées dans l'analyse : on leur étend les valeurs d'écoulements calculées pour les zones situées directement en amont. *b.* Résolution spatiale de la couverture finale obtenue.

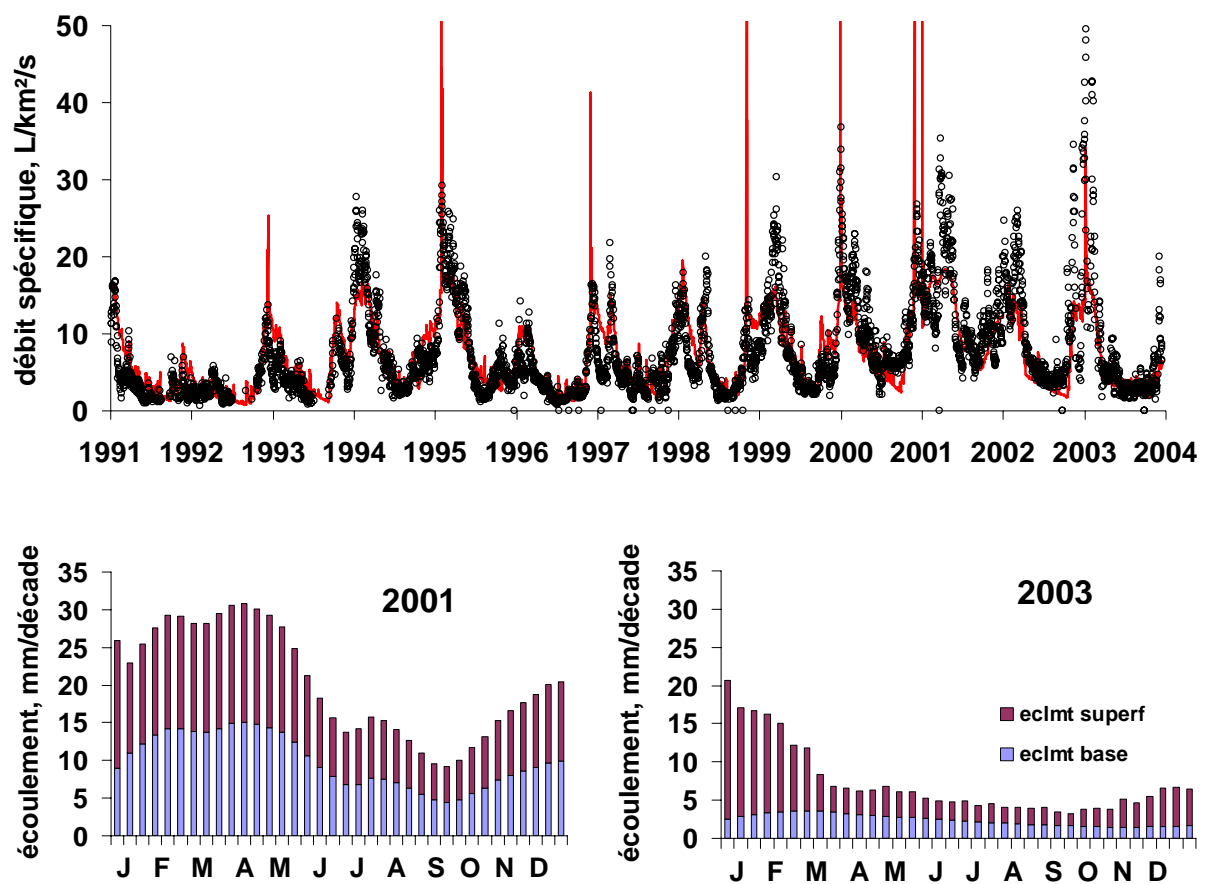
Pour chaque zone ainsi définie, on calcule la moyenne spatiale des pluviométries et ETP journalières à partir des bases météo de SENEQUE, pour toute la période pluriannuelle définie. Le modèle Hydrostrahler est alors mis en œuvre avec ces données en entrées, en faisant systématiquement varier les 4 paramètres dans une gamme raisonnable. La valeur d'initialisation du niveau d'aquifère est également balayée.

Les sorties du modèle, en termes d'écoulement spécifique total décadaire (en l/s/km<sup>2</sup>) sont comparées aux valeurs observées, déduites des mesures de débit à la station aval, éventuellement diminuées des valeurs mesurées dans les stations amont si la zone n'est pas un bassin de tête, et rapportées à la surface de la zone concernée. On ne tient donc pas compte dans cette comparaison d'un éventuel délai de propagation entre les stations amont et aval. Il convient donc que ce délai soit toujours inférieur à la décade.

A l'issue de ces 'runs' systématiques, on retient le jeu de paramètres et la série d'écoulements calculés qui maximisent le critère de Nash relatif aux valeurs calculées et observées des débits spécifiques décadaires sur la période considérée.

$$\text{Nash} = 1 - \frac{\sum (\text{Ecalc}(\text{dec}) - \text{Emoy})^2}{\sum (\text{Eobs}(\text{dec}) - \text{Emoy})^2}$$

A titre d'exemple, la figure 3 présente les résultats de la simulation des écoulements spécifiques de l'inter-bassin de la Seine en amont de Paris et en aval de l'Yonne et des grands Lacs de Champagne sur la période 1991-2003, ainsi que la partition du débit spécifique entre débit de base et débit superficiel pour l'année 2001 (humide) et l'année 2003 (sèche). Le critère de Nash, avec les paramètres retenus, est de .73.



**Figure 3. a.** Simulation de l'écoulements spécifique total 1991-2003 du bassin de la Seine en amont de Paris et en aval de l'Yonne et des grand Lacs de Champagne, par le modèle Hydrostrahler, après calage des 4 paramètres hydrologiques de ce bassin.

**b.** Partition de l'écoulement spécifique entre écoulement de base et écoulement superficiel pour les années 2001 et 2003.

Le tableau 1 présente les valeurs retenues des paramètres hydrologiques des différents sous-bassins considérés dans cet exercice.

*Tableau 1. Paramètres hydrologiques retenus pour les différentes zones considérées dans le découpage du bassin de la Seine.*

<b>bassin</b>	<b>solsat (mm)</b>	<b>tecs, (jour<sup>-1</sup>)</b>	<b>tinf, (jour<sup>-1</sup>)</b>	<b>ten, (jour<sup>-1</sup>)</b>
<b>AISN</b>	175	0.012	0.01	0.0055
<b>ROGN</b>	125	0.042	0.005	0.0055
<b>AUBM</b>	125	0.012	0.005	0.0095
<b>SAMR</b>	175	0.022	0.005	0.0055
<b>YONN</b>	125	0.012	0.005	0.0055
<b>EURV</b>	475	0.001	0.01	0.0005
<b>OISV</b>	475	0.002	0.005	0.0005
<b>MRAV</b>	125	0.012	0.005	0.0055
<b>SEIV</b>	125	0.012	0.01	0.005
<b>POSE</b>	225	0.012	0.035	0.0045

Dans le découpage à résolution relativement faible choisi ici, on ne constate guère de tendances claires quant à la valeur des paramètres hydrologiques en fonction des caractéristiques des bassins. Ces tendances devront être étudiées plus spécifiquement sur des bassins de taille plus réduite, et présentant une plus grande homogénéité de caractéristiques hydro-géologiques. La routine pourra aussi être améliorée pour permettre un calage plus fin des paramètres hydrologiques.

## 5. Conclusion

La procédure décrite ici ayant fait la preuve de son opérationnalité, il reste à l'intégrer dans une interface utilisateur conviviale permettant d'automatiser les traitements de fichiers en synergie avec l'appliquatif SENEQUE, dont elle pourra grandement améliorer les performances en matière de simulation des débits.

## 6. Bibliographie

- Bacq, N. et Billen, G. 2003. Modélisation de la qualité de l'eau des grands sous-bassins amont Eure / Oise / Marne / Seine-Amont. Modèle SENEQUE 3.1 (Piren-Seine). Rapport PIREN-Seine 2003.
- Billen G., J. Garnier, P. Hanset, 1994. Modelling phytoplankton development in whole drainage network: the RIVERSTRAHLER Model applied to the Seine river system. *Hydrobiologia*, 289, 119-137.
- Billen G., J. Garnier, 2000. Nitrogen transfers through the Seine drainage network: a budget based on the application of the RIVERSTRAHLER Model. *Hydrobiologia*, 410, 139-150.
- Ruelland D., 2004. SENEQUE, logiciel SIG de modélisation prospective de la qualité de l'eau. Paris : Hermès, *Revue Internationale de Géomatique*, 14, 97-117.
- Ruelland D., G. Billen, J. Garnier, D. Brunstein. A GIS interface to the Riverstrahler model of the biogeochemical functioning of river systems. Submitted to *Ecol. Modelling*.