

## Exercice n° HA 0101 - Corrigé

### Séparation des écoulements par traçage environnemental - Application au bassin versant de la Haute-Mentue (VD, Suisse)

#### Données de l'exercice :

Les mesures fournies ont été faites dans la partie forestière du bassin de la Haute-Mentue, dans les bois du Jorat. Les teneurs en oxygène 18, de la nappe, de la pluie arrivant au sol et de l'eau du sol sont données dans le tableau 1 -énoncé. Les débits et les teneurs en oxygène 18, Silice et Calcium (Tableau 2-énoncé) ont été enregistrés à l'exutoire du sous-bassin de Bois-Vuacoz (24 ha).

Le fichier Excel « HA0101\_enonce.xls » contient les données de l'événement du 9 septembre 1993. Le corrigé se trouve aussi le fichier Excel « HA0101\_corrige.xls »

#### Question 1. Rappel sur l'utilisation des traceurs

Pour l'utilisation de modèles de mélange isotopiques à deux composantes et un traceur, les hypothèses suivantes sont avancées :

- l'eau « ancienne » est caractérisée par une valeur isotopique unique ou de variation connue, de même que l'eau « nouvelle »
- le signal isotopique de l'eau « ancienne » est significativement différent de celui de l'eau « nouvelle »
- la contribution de l'eau du sol est négligeable ou prise en compte
- la contribution de l'eau stockée en surface est négligeable

L'utilisation de traceurs environnementaux comme la silice et le calcium est sujette aux mêmes hypothèses, auxquelles s'ajoute celle de la non-réactivité des traceurs avec l'environnement qu'ils traversent, ceci du moins à l'échelle de temps de l'événement étudié.

#### Question 2. Séparation des écoulements en deux composantes.

##### ⊙ Méthode à appliquer : modèle mathématique de mélange à deux composantes

Les deux composantes à identifier sont l'eau « ancienne » (i.e. présente dans le bassin versant avant le début de l'épisode pluvieux) et l'eau « nouvelle » qui provient des précipitations.

Le modèle mathématique de mélange consiste à exprimer la conservation du débit à l'exutoire du bassin (équation 1), ainsi que de la masse du traceur observé pour effectuer cette séparation (équation 2).

$$Q_t = Q_a + Q_n \quad (1)$$

$$\delta_t \cdot Q_t = \delta_a \cdot Q_a + \delta_n \cdot Q_n \quad (2)$$

|  |
|--|
| $Q_t$ : débit total mesuré à l'exutoire, en [l/s]                          |
| $Q_a$ : débit de l'eau « ancienne », en [l/s]                              |
| $Q_n$ : débit de l'eau « nouvelle », en [l/s]                              |
| $\delta_t$ : concentration du traceur dans l'écoulement total à l'exutoire |
| $\delta_a$ : concentration du traceur dans l'eau « ancienne »              |
| $\delta_n$ : concentration du traceur dans l'eau « nouvelle »              |

La résolution de ce système est immédiate et l'on obtient :

$$Q_a = Q_t \cdot \frac{\delta_t - \delta_n}{\delta_a - \delta_n} \quad (3)$$

$$Q_n = Q_t - Q_a \quad (4)$$

On peut ainsi calculer pour chaque pas de temps le débit généré par l'eau « ancienne » ; le débit de crue (eau « nouvelle ») peut en être déduit par soustraction du débit total. Comme on ne dispose pas de mesures pour chaque heure, on procède à une interpolation linéaire des débits et de la concentration du traceur observé entre les mesures à défaut d'autres informations.

Cette technique peut être appliquée indifféremment à l'un des trois traceurs environnementaux : les résultats sont alors légèrement différents ce qui est dû notamment à la variabilité d'un événement à l'autre de la concentration en traceur, alors que l'on a retenu ici une valeur moyenne.

### ⊙ Résultats :

Les résultats de la séparation des écoulements avec l'oxygène 18 sont présentés dans la figure 1. Les valeurs numériques sont regroupées dans le tableau 1.

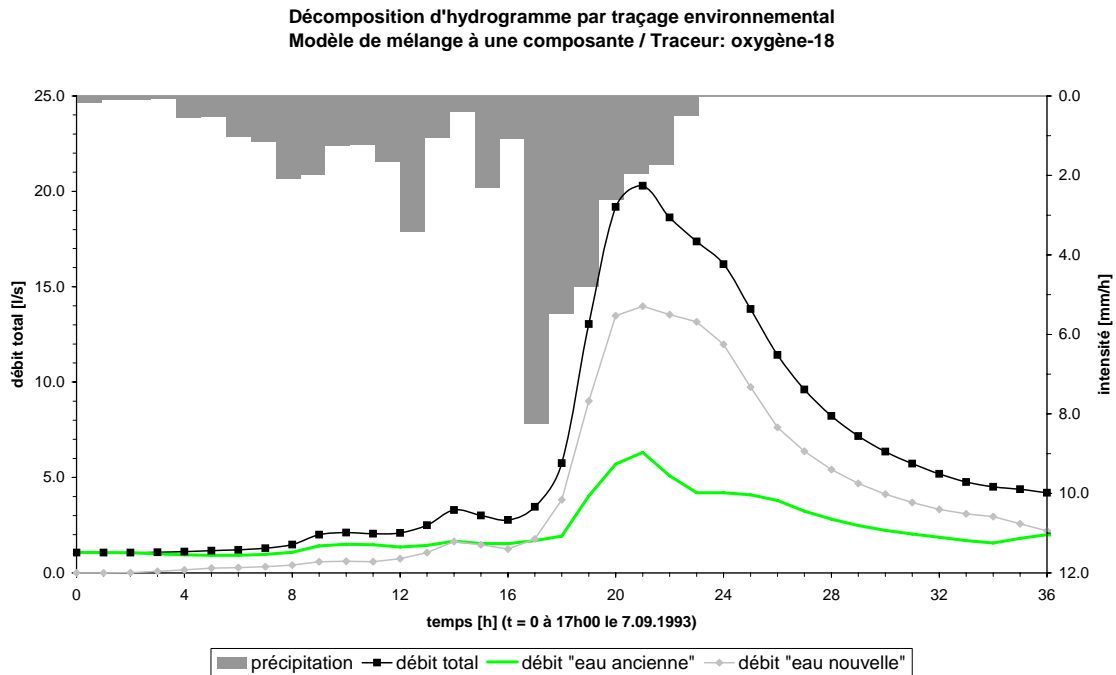


Figure 1 : Séparation par traceur environnemental (oxygène-18) des écoulements pour l'événement du 7 septembre 1993 – bassin versant de Bois-Vuacoz (Haute-Mentue)

Tableau 1 : Résultats numériques de la séparation des écoulements en deux (oxygène-18) et trois composantes (silice et calcium) de l'événement du 7 septembre 1993 observé à Bois-Vuacoz (Haute-Mentue)

| Date & heure   | 2 composantes        |                                 |                                 | 3 composantes            |                               |                          |
|----------------|----------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------------|
|                | Débit total<br>[l/s] | Débit « eau ancienne »<br>[l/s] | Débit « eau nouvelle »<br>[l/s] | Débit « nappe »<br>[l/s] | Débit « eau du sol »<br>[l/s] | Débit « pluie »<br>[l/s] |
| 07.09.93 17:00 | 1.07                 | 1.07                            | 0.00                            | 1.06                     | -0.01                         | 0.02                     |
| 07.09.93 18:00 | 1.07                 | 1.07                            | 0.00                            | 1.09                     | -0.02                         | 0.00                     |
| 07.09.93 19:00 | 1.07                 | 1.06                            | 0.01                            | 1.10                     | -0.03                         | 0.00                     |
| 07.09.93 20:00 | 1.08                 | 1.00                            | 0.08                            | 1.10                     | -0.02                         | 0.00                     |
| 07.09.93 21:00 | 1.11                 | 0.95                            | 0.16                            | 1.11                     | -0.03                         | 0.02                     |
| 07.09.93 22:00 | 1.16                 | 0.92                            | 0.24                            | 1.16                     | -0.04                         | 0.04                     |
| 07.09.93 23:00 | 1.20                 | 0.92                            | 0.28                            | 1.16                     | -0.04                         | 0.08                     |
| 08.09.93 00:00 | 1.29                 | 0.96                            | 0.33                            | 1.19                     | -0.06                         | 0.15                     |
| 08.09.93 01:00 | 1.48                 | 1.08                            | 0.40                            | 1.26                     | -0.06                         | 0.28                     |
| 08.09.93 02:00 | 2.00                 | 1.41                            | 0.59                            | 1.52                     | -0.03                         | 0.51                     |
| 08.09.93 03:00 | 2.11                 | 1.50                            | 0.61                            | 1.59                     | -0.02                         | 0.54                     |
| 08.09.93 04:00 | 2.05                 | 1.47                            | 0.58                            | 1.54                     | 0.00                          | 0.51                     |
| 08.09.93 05:00 | 2.09                 | 1.35                            | 0.74                            | 1.57                     | -0.01                         | 0.52                     |
| 08.09.93 06:00 | 2.50                 | 1.44                            | 1.06                            | 1.66                     | 0.07                          | 0.76                     |
| 08.09.93 07:00 | 3.30                 | 1.66                            | 1.64                            | 1.98                     | 0.18                          | 1.14                     |
| 08.09.93 08:00 | 3.01                 | 1.54                            | 1.47                            | 2.22                     | -0.13                         | 0.91                     |
| 08.09.93 09:00 | 2.77                 | 1.53                            | 1.24                            | 1.87                     | 0.24                          | 0.67                     |
| 08.09.93 10:00 | 3.46                 | 1.69                            | 1.77                            | 2.13                     | 0.41                          | 0.93                     |
| 08.09.93 11:00 | 5.75                 | 1.92                            | 3.83                            | 2.44                     | 0.87                          | 2.44                     |
| 08.09.93 12:00 | 13.04                | 4.03                            | 9.01                            | 4.91                     | 2.38                          | 5.75                     |
| 08.09.93 13:00 | 19.18                | 5.70                            | 13.48                           | 6.85                     | 4.23                          | 8.10                     |
| 08.09.93 14:00 | 20.29                | 6.32                            | 13.97                           | 7.82                     | 5.33                          | 7.14                     |
| 08.09.93 15:00 | 18.63                | 5.09                            | 13.54                           | 7.37                     | 5.09                          | 6.17                     |
| 08.09.93 16:00 | 17.37                | 4.21                            | 13.16                           | 6.94                     | 5.12                          | 5.31                     |
| 08.09.93 17:00 | 16.18                | 4.20                            | 11.98                           | 6.38                     | 5.48                          | 4.33                     |
| 08.09.93 18:00 | 13.83                | 4.09                            | 9.74                            | 5.69                     | 4.68                          | 3.46                     |
| 08.09.93 19:00 | 11.42                | 3.79                            | 7.63                            | 4.90                     | 3.86                          | 2.66                     |
| 08.09.93 20:00 | 9.61                 | 3.24                            | 6.37                            | 4.18                     | 3.39                          | 2.04                     |
| 08.09.93 21:00 | 8.23                 | 2.81                            | 5.42                            | 3.63                     | 3.02                          | 1.58                     |
| 08.09.93 22:00 | 7.17                 | 2.48                            | 4.69                            | 3.27                     | 2.59                          | 1.30                     |
| 08.09.93 23:00 | 6.35                 | 2.23                            | 4.12                            | 3.00                     | 2.26                          | 1.10                     |
| 09.09.93 00:00 | 5.72                 | 2.03                            | 3.69                            | 2.75                     | 1.96                          | 1.00                     |
| 09.09.93 01:00 | 5.19                 | 1.87                            | 3.32                            | 2.55                     | 1.72                          | 0.92                     |
| 09.09.93 02:00 | 4.77                 | 1.68                            | 3.09                            | 2.38                     | 1.60                          | 0.79                     |
| 09.09.93 03:00 | 4.51                 | 1.56                            | 2.95                            | 2.28                     | 1.54                          | 0.69                     |
| 09.09.93 04:00 | 4.38                 | 1.80                            | 2.58                            | 2.27                     | 1.42                          | 0.70                     |
| 09.09.93 05:00 | 4.20                 | 2.00                            | 2.20                            | 2.23                     | 1.29                          | 0.69                     |
| 09.09.93 06:00 | 4.06                 | 1.86                            | 2.20                            | 2.19                     | 1.23                          | 0.64                     |
| 09.09.93 07:00 | 3.93                 | 1.72                            | 2.21                            | 2.15                     | 1.18                          | 0.59                     |

### Question 3. Séparation des écoulements en 3 composantes.

☉ Méthode à appliquer : modèle mathématique de mélange à trois composantes

Cette séparation se base sur le même principe que celle à deux composantes, mais il faut définir une 3<sup>ème</sup> relation ainsi qu'introduire le 2<sup>ème</sup> traceur dans ces relations comme le montre l'équation (5).

$$\delta_t^j \cdot Q_t = \sum_{i=1}^n \delta_i^j \cdot Q_i \quad (5) \text{ avec :}$$

$Q_t$  : débit total mesuré à l'exutoire, en [l/s]  
 $Q_i$  : débit de la composante  $i$ , en [l/s]  
 $\delta_t^j$  : concentration du traceur  $j$  dans l'écoulement total à l'exutoire  
 $\delta_i^j$  : concentration du traceur  $j$  dans l'écoulement de la composante  $i$

⊙ Résultats :

Les résultats de la séparation des écoulements avec la silice et le calcium sont présentés dans la figure 2. Les valeurs numériques sont regroupées dans le tableau 1.

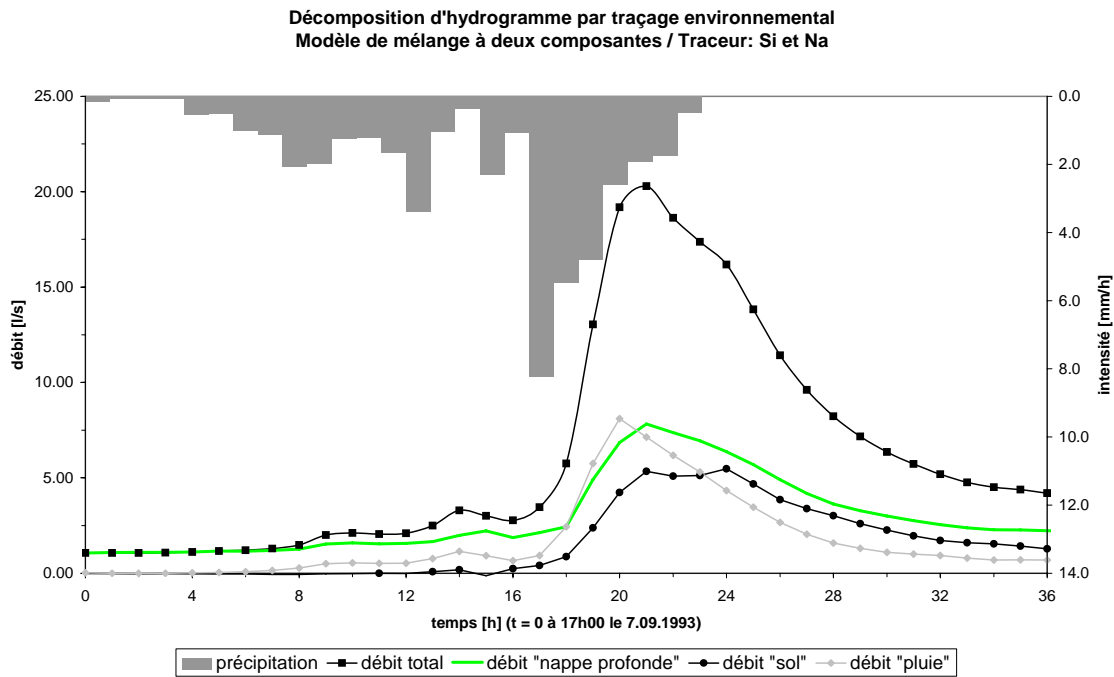


Figure 2 : Séparation par traceur environnemental (oxygène-18) des écoulements pour l'événement du 7 septembre 1993 – bassin versant de Bois-Vuacoz (Haute-Mentue)

**Question 4. Autre technique de séparation des écoulements ?**

⊙ Méthode à appliquer : Séparation des écoulements par la méthode graphique

La séparation des écoulements par traçage environnemental ne se justifiant que pour des études très pointues, à cause du coût de cette technique, l'estimation des différentes composantes de l'écoulement s'effectue généralement en faisant l'hypothèse que chaque composante possède une courbe de tarissement qui lui est propre ; celle-ci s'exprime de la manière suivante :

$$Q(t) = Q_0 \cdot e^{-\alpha \cdot t} \quad (6)$$

$Q(t)$  : débit total à l'instant  $t$ , en [l/s]  
 $Q_0$  : débit initial à l'instant  $t_0$ , en [l/s]  
 $t$  : temps écoulé depuis l'observation de  $Q_0$ , en [h]  
 $\alpha$  : coefficient de tarissement, en [1/h]

Il s'agit donc d'identifier le tarissement sur un hydrogramme et le débit de base en procédant à la séparation des écoulements. Cette technique se base sur une représentation logarithmique de la

décroissance du débit en fonction du temps. Une telle représentation est censée mettre en évidence les cassures de la courbe de décrue et par conséquent les différents types d'écoulement..

⊙ Démarche et résultats :

**Etape 1 :** Identification de la date de début de ruissellement à partir de l'hydrogramme de crue (augmentation brutale au début de l'évènement)

**Début de l'écoulement rapide** 5h00 le 8 septembre

**Etape 2 :** Identification de la date de fin de ruissellement par la méthode graphique (Figure 1).

Représentation logarithmique de la décroissance du débit en fonction du temps.

Mise en évidence des cassures de la courbe de décrue et par conséquent des différents types d'écoulement (ajustement à l'œil de droites). Le point d'intersection entre la droite de tarissement et la droite « précédente » est le point de fin du ruissellement de surface.

**Fin de l'écoulement retardé** 00h00 le 9 septembre 1993

**Etape 3 :** Séparation de l'écoulement de surface et de l'écoulement de base par la méthode de « la ligne droite » *Straight line method*. (Figure 1). Tracer la droite entre les dates de début et de fin de ruissellement.

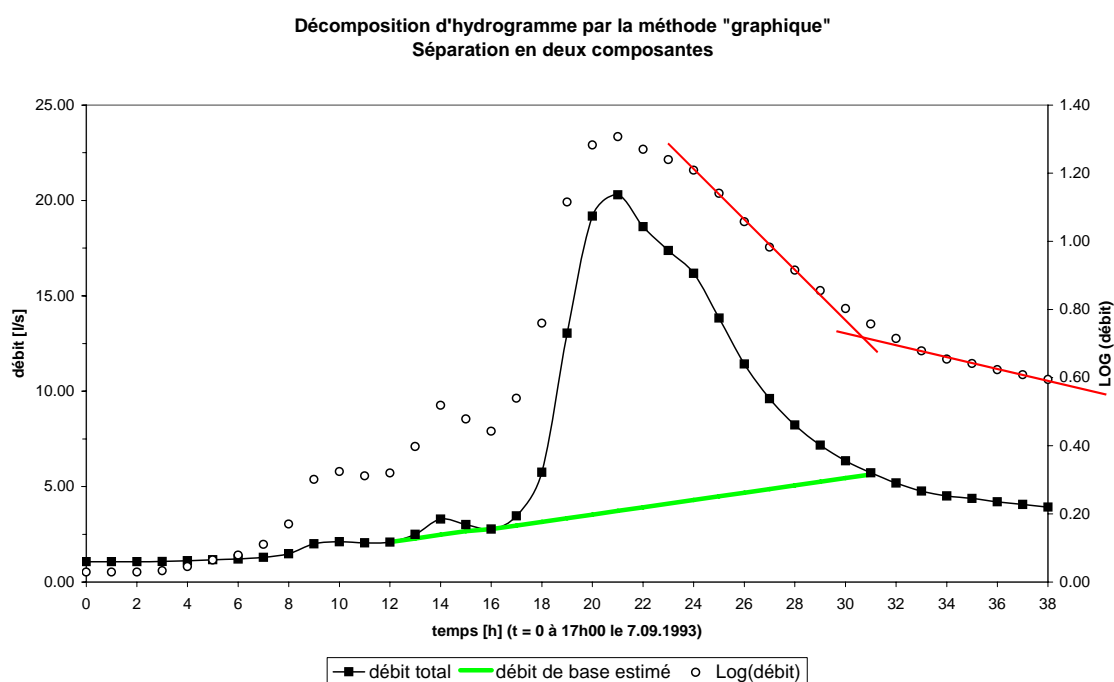


Figure 3 : Séparation des écoulements par la méthode graphique pour l'évènement du 7 septembre 1993 – bassin versant de Bois-Vuacoz (Haute-Mentue)

Le modèle de mélange fait apparaître un pic à  $t = 21$  heures pour le débit de base (graphique 1), ce qui suggère un effet « piston » de la pluie sur le débit de base (eau « ancienne »). Au contraire la séparation graphique adoptée fait l'hypothèse d'une variation linéaire du débit de base à défaut d'informations autres que le début et la fin supposés de l'écoulement rapide.