
ETUDE DES MÉCANISMES HYDRAULIQUES DE TRANSFERT DE CONTAMINANTS DANS UN COLLECTEUR D'ASSAINISSEMENT UNITAIRE

1 INTRODUCTION

A la différence des chapitres précédents consacrés pour l'essentiel aux phénomènes de production, ce chapitre est focalisé sur les phénomènes de transfert, et à leurs conséquences sur les relations entre hydrogrammes et pollutogrammes,

A partir d'une configuration simplifiée à l'extrême constituée d'un collecteur unique, nous allons simuler avec un modèle hydraulique 1D le transfert d'une injection de débit et de polluant. L'objectif final visé est de parvenir à localiser plus ou moins finement l'origine des flux de contaminants observés à l'aval d'un réseau d'assainissement uniquement à partir des hydrogrammes et pollutogrammes observés, complétés par une connaissance des caractéristiques physiques du réseau et de son fonctionnement hydrologique et hydraulique. Il s'agit donc à terme d'inverser un modèle de transfert pour localiser des sources à l'image de ce que se pratique pour le transport solide en rivière (Williams 1989).

Dans l'immédiat, ce chapitre reste dans une logique de modélisation directe, avec pour objectif de bien comprendre les phénomènes en jeu. Il décrit brièvement les outils numériques utilisés, puis il présente qualitativement les phénomènes mis en évidence par les simulations, à savoir le retard de l'onde de concentration sur l'onde de débit et l'effet piston. Il présente enfin une étude de sensibilité de ces phénomènes à différents paramètres caractérisant l'hydraulique du système.

2 CAS ÉTUDIÉ

Le banc d'essai numérique est inspiré du cas réel de réseaux d'assainissement de Quais et de Clichy. Le type de la section est un collecteur à deux banquettes de largeur dans la cunette

variable entre 1 et 3 m. La section simplifiée choisie sera un rectangle dont la largeur est égale à une largeur intermédiaire de la cunette du collecteur principale de Quais et Clichy avec une hauteur infinie. Les caractéristiques de ce collecteur sont listées dans le *Tableau 44*.

Dans ce collecteur dont le débit initial Q_{EU} associé à un marqueur de concentration C_{EU} est constant, est injecté un hydrogramme (demi-sinusoïdal) caractérisé par sa durée D et sa valeur maximum Q_{EP} (*Figure 183*). L'hydrogramme injecté est associé à un marqueur de concentration C_{EP} constante différent du marqueur du débit initial. En pratique seules les valeurs conventionnelles 0 ou 1 ont été affectées aux concentrations, ce qui facilite l'identification de l'origine des masses d'eau et l'interprétation des valeurs intermédiaires résultant de leur mélange.

Tableau 44 : Caractéristiques du collecteur équivalent prises pour faire le calcul

Longueur	Section rectangulaire		Pente S_0	K-Manning-Strickler
$L=5 \text{ Km}$	$B = 1,6 \text{ m}$	$H = \infty$	$0,14\%$	$70 \text{ m}^{\frac{1}{3}} / \text{s}$

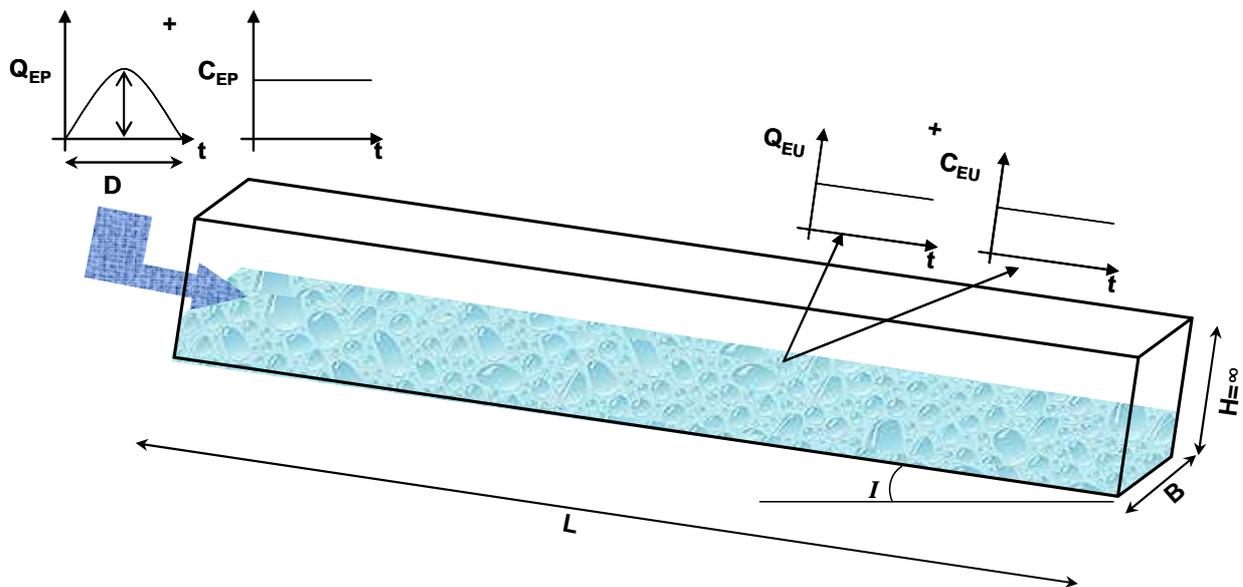


Figure 183 : Caractéristiques du collecteur et des conditions aux limites des simulations

Dans le collecteur, on observe à l'aval immédiat du point d'injection une concentration variable dans le temps, résultant du mélange d'un débit constant d'eau initiale avec un débit variable d'eau injectée. On génère ainsi dès l'amont du collecteur un pollutogramme de concentration variable, présentant un maximum synchrone avec celui du débit.

Notons que cette injection peut être interprétée comme la représentation d'un apport d'eaux de ruissellement depuis la surface, voire comme la reprise au passage de l'hydrogramme de débit d'un dépôt situé au niveau du point d'injection. Le débit permanent quand à lui représente les apports d'eaux usées, avant et pendant l'événement pluvieux. Dans la suite on désignera souvent l'eau injectée comme de l'eau « pluviale » et l'écoulement initial comme de l'eau « usée ». Les notations adoptées reflètent cette analogie.

3 MODELISATION

L'évolution de l'écoulement dans le temps et selon une direction de l'espace à la suite de l'injection d'un hydrogramme ont été traduits par les équations de Barré de Saint-Venant. Le transport de marqueurs dissous est décrit par une simple loi d'advection et porté par l'écoulement à la vitesse u . Un soin particulier a été apporté au choix du schéma numérique utilisé de manière à représenter correctement les phénomènes d'ondes de gravité, ainsi qu'à la représentation des conditions à la limite amont. Le travail de simulation a été mené en étroite collaboration avec l'Institut de Mécanique des Fluides et des Solides de Strasbourg, dans le cadre de la thèse de Sandra Isel consacrée au « Développement de méthodologies et d'outils numériques pour la mise en place et l'exploitation de la mesure en réseau d'assainissement » (Isel, 2013).

3.1 Equations

3.1.1 Hydraulique

La propagation des hauteurs, des vitesses et des débits est décrite par les équations de Barré de Saint-Venant (BSV) dont il existe différentes formulations (Henderson, 1966; French, 1985). On s'intéresse ici à la forme conservative :

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} + gI_1 \right) = g(S_0 - S_f) + gI_2 \end{cases}$$

Avec A la surface mouillée, Q le débit, I_1 terme de pression hydrostatique, I_2 terme de pression latérale, S_0 la pente du fond du canal et S_f pente représentative des forces de frottement longitudinales de l'écoulement.

3.1.2 Advection

L'advection est un mode de transfert d'une propriété ou d'une quantité, par exemple la concentration de contaminants ou d'un marqueur, par le déplacement de la masse d'un fluide.

Elle est décrite par l'équation suivante où la concentration $C(x,t)$ est advectée par un

écoulement à vitesse constante u : $\frac{\delta C}{\delta t} + u \frac{\delta C}{\delta x} = 0$. L'intérêt de cette équation est qu'elle est

indépendante, c'est-à-dire qu'il est possible de calculer la concentration en tout point du collecteur à chaque instant donné à partir de la connaissance des vitesses en ces points. Ainsi cette équation ne nécessite pas d'être couplée en temps réel aux équations de Barré de Saint-Venant. De plus, comme on s'intéresse à l'évolution des fronts d'onde, il est possible de s'affranchir du terme de diffusion (second terme de l'équation sera égal à zéro) car celle-ci a une influence négligeable dans la direction du collecteur.

3.2 Implémentation

3.2.1 Schéma numérique utilisé dans le modèle hydrodynamique

Bien qu'étudiée depuis longtemps, la résolution des équations de BSV demeure encore compliquée car elles n'admettent pas de solution analytique. Il est donc nécessaire d'approcher ces solutions à l'aide de méthodes numériques. Plusieurs critères permettent de choisir entre les différentes méthodes existantes, les logiciels classiques d'hydrologie urbaine favorisant la rapidité et l'économie de puissance de calcul. En effet, ces logiciels ont été développés il y a une dizaine d'années au moins, à l'époque où la capacité de calcul des outils numériques était faible. Ainsi, ces codes se focalisent sur les schémas d'Abbott Ionescu ou Preissmann simplifiés. Ces simplifications et leurs conséquences sur la précision de la résolution des équations de BSV, et notamment sur le calcul des célérités d'onde, ont été étudiées par exemple dans la thèse de P. Finaud-Guyot (Finaud-Guyot, 2009).

Suite à ces constatations, le choix du schéma numérique utilisé pour la modélisation hydrodynamique s'est porté sur un schéma numérique centré implicite de type TVD (*Total Variation Diminishing*) du premier ordre utilisant le solveur de Roe avec un traitement *UPWIND* du terme source. Ces méthodes produisent des résultats non oscillatoires au voisinage de discontinuités. Les conditions aux limites ont été intégrées par la méthode des caractéristiques, basée sur le principe de la transmission de l'onde de débit dans l'écoulement

selon les vitesses $u+c$ et $u-c$ (avec u =vitesse moyenne de l'écoulement et c =célérité de l'onde de débit par rapport à la masse d'eau $=\sqrt{gD_h}$ avec $D_h = f(h)$ où h est le niveau d'eau en réseau d'assainissement). Ce code a déjà été validé à maintes reprises sur des données expérimentales et de terrain (Abdallah, 2005; Kesserwani, 2008). Il est conservatif, stable et sa diffusion numérique a été limitée en fixant la valeur du coefficient de *Friedrich Levy* (CFL) à une valeur proche de 1 (pour un temps de calcul acceptable).

3.2.2 Discrétisation

Le collecteur a été discrétisé en 100 mailles le long de la longueur du collecteur $L=5\text{ Km}$ (longueur d'une maille = 50 m). Nous calculons ensuite le débit Q et la concentration C (et aussi la vitesse u et hauteur h) à chaque instant et à chaque abscisse x . La discrétisation dans le temps est variable et optimisée à chaque pas sur la base d'un CFL de 0,8. La durée d'une simulation est de l'ordre de 10 à 30 minutes.

3.3 Exemple de résultats

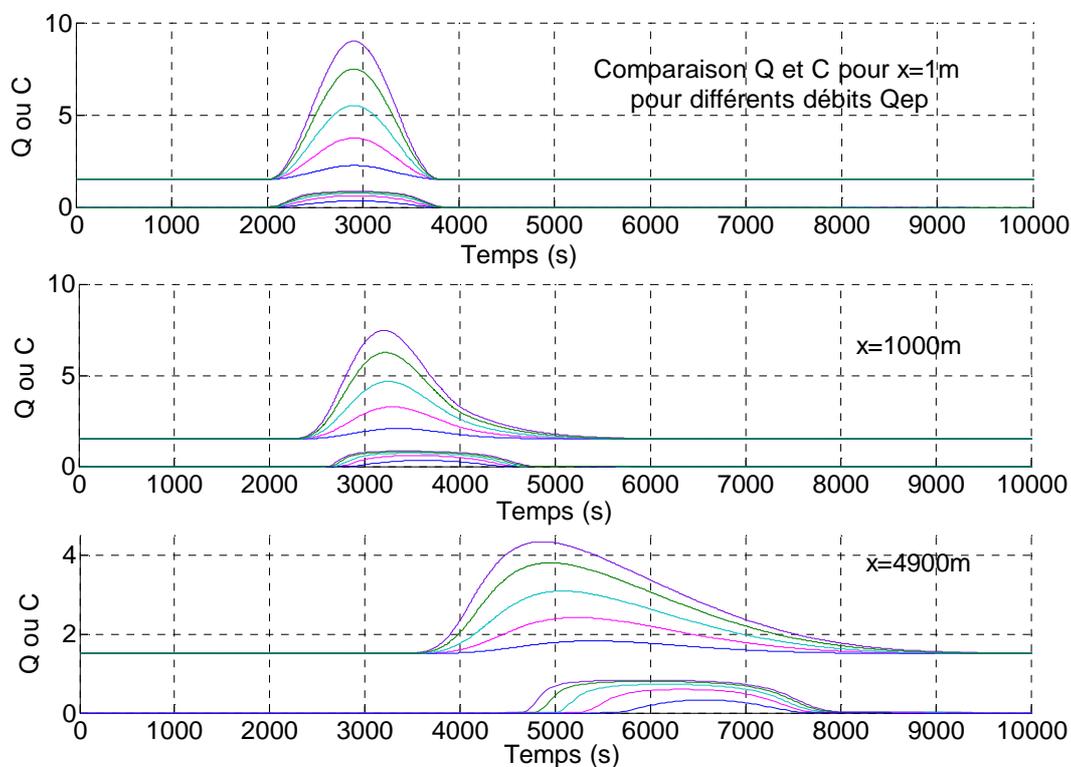


Figure 184 : Exemple de sorties de simulation avec le marquage de l'hydrogramme injecté par une concentration égale à 1

La *Figure 184* donne un exemple de sorties fourni par les simulations pour un marquage des l'hydrogramme injecté avec une concentration de 1. On voit que plus le débit injecté est important, moins l'effet de dilution par l'écoulement permanent est sensible, et plus le pollutogramme résultant se rapproche de la forme du créneau de concentration injecté. Pour faciliter la détection du maximum du pollutogramme il pourra être intéressant à l'avenir d'injecter un deuxième marqueur, pendant un temps limité au voisinage de la pointe de l'hydrogramme.

4 PHÉNOMÈNES MIS EN ÉVIDENCE PAR LES SIMULATIONS

En fonction du mode de marquage par les concentrations utilisé, deux types de phénomènes ont été mis en évidence par les simulations.

Un premier type de simulation permet d'identifier les différences de vitesses entre l'onde de débit et la masse d'eau injectée. Pour ce faire, l'eau injectée a été marquée par une concentration égale à 1 alors que le débit permanent a une concentration nulle.

Le deuxième type de simulation permet de mettre en évidence un effet piston sur l'eau déjà présente avant l'injection. Cette simulation est caractérisée par un marqueur de concentration du débit permanent fixé à 1 alors que l'hydrogramme injecté a une concentration nulle.

4.1 Différences de temps de transfert

La *Figure 185* présente les résultats obtenus avec le marquage à une concentration égale à 1 du volume injecté. L'onde de débit se propage à la vitesse $u + c$ supérieure à la vitesse u de transport du marqueur, ce qui entraîne un décalage temporel entre l'hydrogramme et le pollutogramme. La différence entre les deux vitesses de propagation correspond à la célérité des ondes de surface. En première approximation cette célérité est de l'ordre des deux tiers de la vitesse de l'eau u (Huisman *et al.*, 2000), mais elle varie avec la forme, le taux de remplissage de la conduite avant que ne survienne la variation de débit et avec l'amplitude de cette variation (Henderson, 1966).

Cet effet est connu depuis longtemps, et dans le domaine de l'assainissement il a fait l'objet d'études expérimentales (Huisman *et al.*, 2000) ou numériques (Rutsch *et al.*, 2005)

notamment qui ont observé la séparation entre l'onde de débit induite et la masse d'eau advectée après injection artificielle d'une impulsion de débit dans un collecteur.

Dans le contexte d'un réseau unitaire, la situation où la pollution est injectée depuis la surface en même temps que les eaux pluviales conduirait donc systématiquement à un retard de la concentration d'un polluant sur le débit. Ce serait aussi le cas si le polluant était présent dans un dépôt et mobilisé au passage d'un hydrogramme. Par analogie avec le phénomène de « first flush » (Bertrand-Krajewski *et al.*, 1998) ce phénomène peut être qualifié de « last flush » si la concentration apportée par le débit est supérieure à celle de l'écoulement dans lequel elle est injectée.

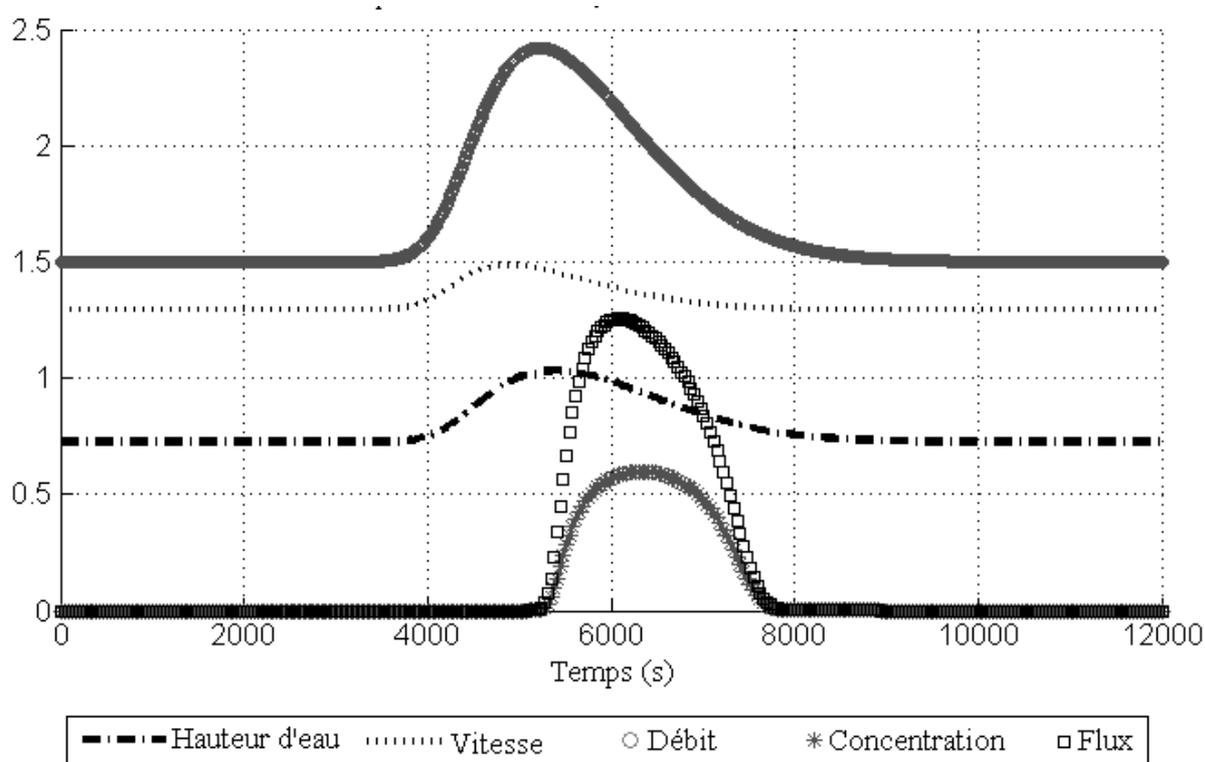


Figure 185 : Décalage entre l'onde de débit et la concentration (x=5000 m)

4.2 Effet piston

La Figure 186 présente les résultats obtenus avec le marquage à 1 de l'écoulement permanent.

L'effet d'avance du débit sur la concentration est toujours visible et dans les mêmes proportions que pour le type de simulation précédent, mais son effet est inversé : la courbe de concentration est simplement symétrique par rapport à la droite $C = 0,5$.

La nouveauté réside dans la courbe des flux : on observe *une augmentation du flux à concentration constante* en début d'hydrogramme identifiée comme la phase 1 sur la *Figure 186, (1)*. Ceci est dû à l'augmentation du débit alors même que la concentration n'a pas encore évolué car soumise au retard lié à l'advection. Dans le contexte d'un réseau unitaire, l'eau pluviale « chasse » l'eau usée qui se trouve initialement dans le réseau. Ce phénomène est analogue au « first flush » (Krebs *et al.*, 1999), à ceci près que la concentration reste constante

La deuxième phase ou phase de décrue du flux correspond à l'arrivée de la masse d'eau diluée à l'exutoire du collecteur et se traduit donc par une diminution du flux de contaminants.

La dernière phase correspond à un retour aux conditions de débit et de concentration initiales après passage de la pluie se traduisant par une augmentation du flux de contaminants pour atteindre sa valeur de temps sec.

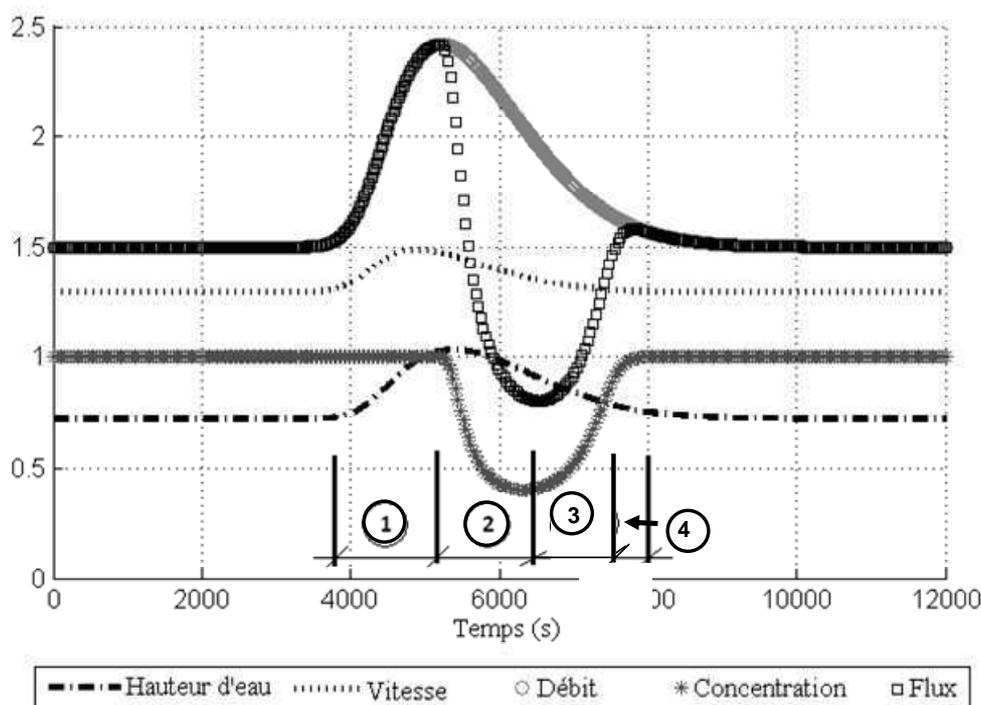


Figure 186: Illustration de l'effet piston

On observe sur ces simulations un phénomène non signalé dans la littérature, qui est d'ailleurs très peu abondante sur le sujet : une légère augmentation de flux à concentration constante en fin d'événement (phase 3) est liée à un retard du retour de la hauteur d'eau, et donc du débit, à sa valeur initiale (alors que la vitesse a repris sa vitesse initiale). Cet effet est inverse de celui

qui a été observé par (Kafi-Benyahia, 2006) sur les données expérimentales de bassins versants parisiens d'OPUR (Phase 2) où le retour aux concentrations était retardé par rapport au retour au débit de temps sec. Cet effet méritait d'être confirmé et le cas échéant étudié plus en détail. Il n'a pas été pris en compte dans la suite de ce travail.

L'effet piston n'est donc qu'une autre manifestation du retard de la masse sur le débit. La *Figure 187* tente de proposer une explication intuitive de ce phénomène.

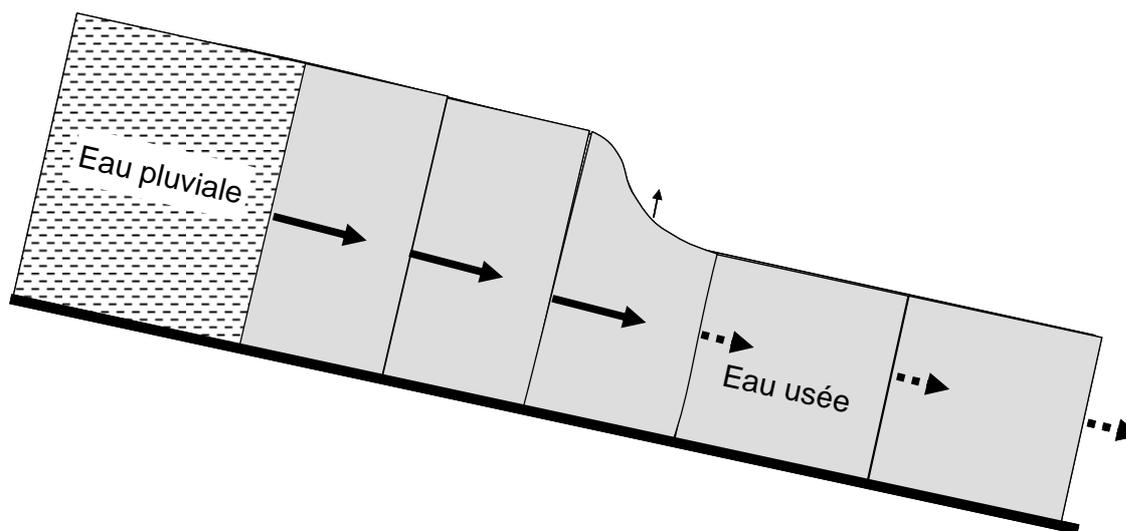


Figure 187 : Illustration intuitive de l'effet piston et de la propagation de l'onde de débit

L'eau pluviale (additionnée de l'eau usée entrant dans la section amont pendant la durée de l'injection) « pousse » une première tranche d'eaux usées, qui se comprime dans le sens de l'écoulement ce qui induit une augmentation du tirant d'eau et de la vitesse. Le phénomène se propage de proche en proche vers l'aval. L'augmentation du débit est donc obtenue en mobilisant l'eau usée présente à l'avant de la masse d'eau pluviale circulant dans le collecteur.

5 ETUDE DE SENSIBILITÉ

5.1 Méthode

Une fois les différents phénomènes identifiés, nous avons cherché à préciser les facteurs influençant ces phénomènes et à quantifier cette influence. Dans ce qui suit nous nous intéresserons aux concentrations plutôt qu'aux flux dans la mesure où la concentration caractérise le transfert d'un marqueur ou d'un contaminant si la production est supposée

connue. L'effet piston, qui se traduit par une augmentation de flux à concentration constante ne sera pas traité explicitement, car toute l'information fournie par les simulations peut être exploitée en termes de décalage entre hydrogramme et pollutogramme de concentration.

5.1.1 Paramètres

L'étude de sensibilité portera sur les paramètres explicatifs des vitesses d'advection tels que la pente, le débit d'eaux usées et le débit d'eaux pluviales. En outre la combinaison de la pente et du débit d'eau usée déterminent la hauteur et la vitesse initiales dans le collecteur, et donc la célérité de propagation d'une petite perturbation. Par ailleurs on peut penser que les volumes en jeu sont déterminants : dans un collecteur initialement vide l'onde de la masse d'eau et l'onde de débit se propageraient toutes deux avec la vitesse d'advection, car la propagation de l'onde de débit n'est due qu'à la mobilisation et à l'accélération du volume d'eau usée disponible à l'avant du volume injecté. Certes la célérité dépend de ce tirant d'eau initial, mais de manière indépendante de la valeur du débit à propager. Pour vérifier si cette valeur a un effet, on a d'une part fait varier le débit d'eau pluviales en appliquant un facteur multiplicatif au débit d'eaux usées (on *conserve* ainsi le rapport des volumes pour la forme des hydrogrammes utilisés), et d'autre part on a fait varier la durée de l'injection indépendamment de ce facteur (on fait ainsi *varier* le rapport entre le volume injecté et le volume disponible à l'aval). Cette durée détermine aussi la forme de l'hydrogramme en termes de vitesse de variation : les durées les plus courtes induisent les plus grandes vitesses de variation du débit injecté et des variables (tirant d'eau, vitesse) associées à ce débit.

Les gammes de variations de chaque paramètre sont définies dans le tableau ci après, et sont à peu près réalistes dans le contexte du collecteur de Clichy. Néanmoins certaines combinaisons (forts débits et faible pente) sortent de ce cadre réaliste, avec notamment des tirants d'eau très importants.

Tableau 45 : Valeurs de variables représentatives des phénomènes utilisées pour l'étude de la sensibilité

Pente S_0 (%)	Durée de la pluie (s)	Q_{EU} (m^3 / s)	$\frac{Q_{EP}}{Q_{EU}}$
Entre 0.03 et 0.5	Entre 1800 et 43000 (30 mn à 12 heures)	Entre 0.5 et 2.7	Entre 0.1 et 10

La *Figure 188* montre le caractère fortement non linéaire des relations hauteur-vitesse et débit-vitesse, dû à une stabilisation de la vitesse au-delà de $3 m^3/s$. Du fait de cette

stabilisation et de la forme rectangulaire du canal (quand $H \gg B$, le rayon hydraulique tend vers $B/2$), les variations de débit sont quasiment linéaires en fonction des variations de tirant d'eau (Figure 189).

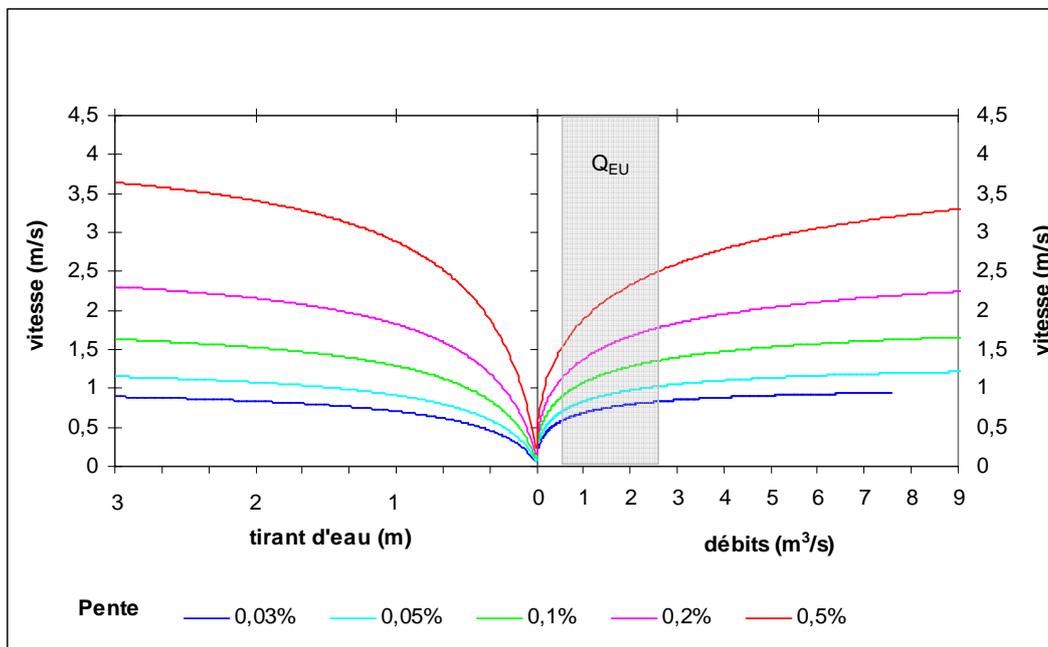


Figure 188 : Relations tirant d'eau-vitesse-débit pour différentes valeurs de pente du collecteur simulé (en gris gamme de variation de Q_{EU})

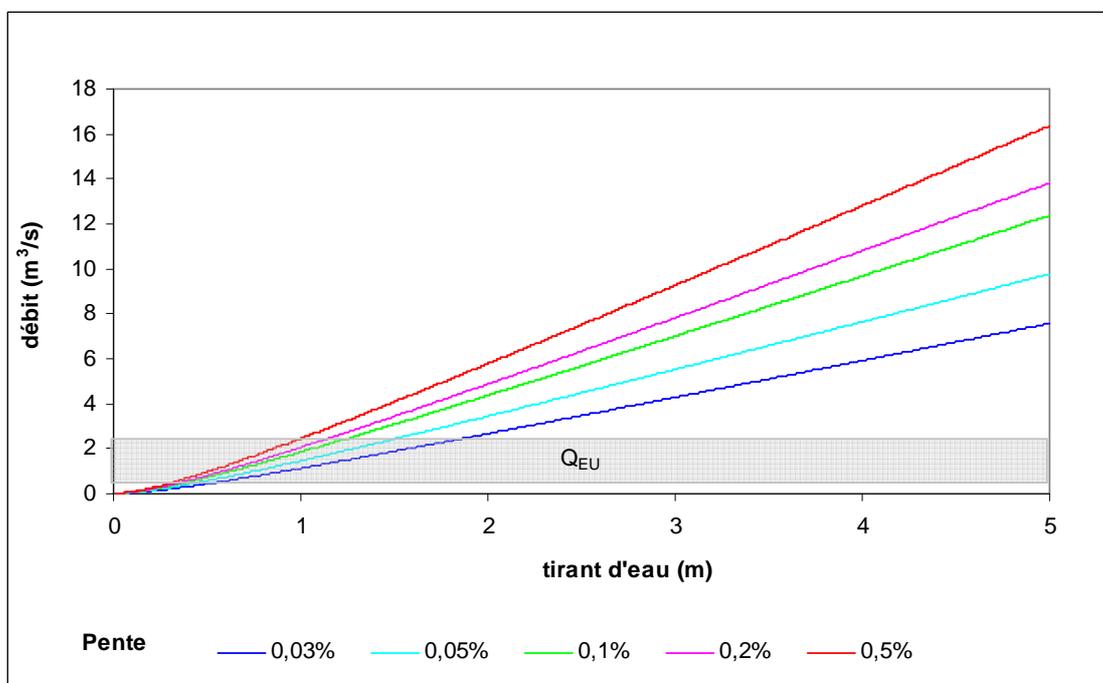


Figure 189 : Relations tirant d'eau-débit pour différentes valeurs de pente du collecteur simulé (en gris gamme de variation de Q_{EU})

En pratique deux séries de simulations ont été réalisées, l'une pour étudier l'effet conjoint de la durée de l'injection et des débits d'eaux usées et d'eaux pluviales, et l'autre l'effet conjoint pour étudier de la durée de l'injection et de la pente :

Pente constante (0,14%) : 7 valeurs de Q_{EP}/Q_{EU} (0.1, 0.8, 1.67, 2.48, 4.59, 7,10) x 5 valeurs de Q_{EU} (0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 m³/s) x 7 valeurs de D (1 800, 5 000, 9 000, 15 000, 21 000, 30 000, 43000 s)

Q_{EU} et Q_{EP}/Q_{EU} constants (1.5 m³/s et 1.5) : 9 valeurs de pente (échelonnées progressivement par pas de 0.05 puis 0.1, puis 0.15 % entre 0.03% et 0.5%) x 6 valeurs de D (1800, 5000, 9000, 13000, 18000, 21000 s)

5.1.2 Facteur de décalage temporel

L'interprétation classique du décalage entre une onde de débit et l'onde de concentration associée est basée sur des vitesses et des célérités. Celles-ci permettent d'évaluer un décalage temporel en fonction de la distance au point d'injection. Si on suppose que les vitesses et célérités impliquées sont peu variables au cours d'une simulation pour un jeu de paramètres donnés, le décalage temporel sera proportionnel à la distance. Pour tester cette hypothèse on a défini un « facteur de décalage » adimensionnel qui caractérise le décalage temporel indépendamment de la distance. De plus la pente a un effet trivial en accélérant toutes les vitesses d'écoulement. Le facteur de décalage corrige dans une certaine mesure cet effet, en rapportant les différences de temps de transfert aux temps de transfert du débit.

Deux versions de ce facteur ont été testées. Fd_d est basé sur les durées séparant le début de l'injection du début des ondes de débit et de concentration. Fd_p reprend une définition analogue, mais les durées sont basées sur les pics des ondes de concentration et de débit et référencées dans le temps par rapport au pic de l'injection. Nous ne présentons que les résultats relatifs à cette deuxième définition. Celle-ci se prête peut-être moins bien à une analyse théorique (la perturbation apportée par l'injection est très loin d'être infinitésimale au niveau du pic de l'hydrogramme), mais elle présente des avantages pratiques : le pic d'une onde est plus facile à identifier que son début, et il est plus significatif vis-à-vis des applications car les pics contribuent fortement aux masses et volumes apportées par un événement pluvieux.

$$Fd_p(x) = \frac{t_p(x, C) - t_p(x, Q)}{t_p(x, Q)}$$

avec $t_p(x, C)$ la durée séparant le pic de l'hydrogramme injecté du pic du pollutogramme observé dans la section d'abscisse x et $t_p(x, Q)$ la durée séparant le pic de l'hydrogramme injecté du pic de l'hydrogramme observé dans la section d'abscisse x .

Si les hypothèses sont vérifiées, on s'attend à ce que le facteur de décalage dépende peu de la distance au point d'injection. En revanche le facteur de décalage n'est pas adapté à la problématique d'inversion présentée en introduction car il suppose connu le temps de transfert, ou la distance séparant le point d'injection du point d'observation. Ces grandeurs sont précisément celles que l'on cherche à identifier par l'inversion. Pour traiter le problème inverse il faudra tout d'abord évaluer par modélisation directe le décalage maximum (produit du facteur de décalage par le temps de transfert maximum) correspondant aux sources les plus lointaines. Le rapport du décalage observé au décalage maximum permettra alors d'évaluer la distance (exprimée en temps de transfert) de la source par rapport aux sources les plus lointaines selon l'équation suivante.

$$t(x) = \frac{Fd_p(x)}{Fd_p(x_{\max})} t(x_{\max})$$

5.1.3 Facteurs explicatifs

Pour interpréter les résultats d'une manière transposable, nous avons cherché à combiner les paramètres de l'étude de sensibilité pour définir des facteurs adimensionnels ayant un pouvoir explicatif.

En première approximation on peut évaluer la valeur du facteur de décalage $Fd_p(x)$ par un indice Id_p calculé à partir d'estimations t_{est} des temps de transfert :

$$Id_p = \frac{t_{est.}(pollutogramme) - t_{est.}(hydrogramme)}{t_{est.}(hydrogramme)} = \frac{\frac{x}{u_1} - \frac{x}{u_2 + c}}{\frac{x}{u_2 + c}} = \alpha \left(1 + \frac{1}{Fr} \right) - 1 = Id_p$$

avec :

x : distance par rapport au point d'injection du débit

u_1 : vitesse d'advection de la masse, approchée par la vitesse maximum apparaissant au cours de la simulation dans la section d'abscisse x .

u_2 : vitesse de l'écoulement d'eaux usées à l'avant de l'hydrogramme. C'est aussi la vitesse minimum observée dans chaque section.

c : célérité associée à cet écoulement $c = \sqrt{gh_{EU}}$ où h_{EU} est la hauteur d'eau de l'écoulement initial

Fr : nombre de Froude de cet écoulement $Fr = u_2/c$

$$\alpha = \frac{u_2}{u_1} = \frac{u_{\min}}{u_{\max}}$$

Ces approximations de vitesse par u_1 et u_2 sont envisageables car sur l'ensemble d'un événement, la vitesse de l'écoulement n'a pas une grande amplitude de variations (au maximum 60%)

Comme prévu lors de la construction du facteur Fd_p , l'abscisse x n'apparaît pas dans l'expression finale de Id_p . Cette expression, qui ne tient pas compte d'éventuels effets de volume, suggère que Id_p varie comme $1/Fr$ si α est constant : l'indice de décalage diminue si la pente augmente (à Q_{EU} constant) ou si Q_{EU} diminue (à pente constante). En effet ces deux scénarios diminuent la célérité, en faisant baisser le tirant d'eau plus vite que la vitesse associée.

Si Fr est constant Id_p varie comme α : il diminue lorsque Q_{EP}/Q_{EU} augmente (avec Fr fixe, voir *Figure 191*) car la vitesse d'advection augmente.

5.1.4 Variation des facteurs avec les paramètres des simulations

5.1.4.1 Nombre de Froude de l'écoulement initial

Comme le montre la *Figure 190*, Fr varie assez peu (de 0,44 à 0,53) avec Q_{EU} (pour une pente fixe à 0,14%), et il varie beaucoup (de 0,19 à 0,97) avec la pente dans les gammes de variation retenue pour les paramètres.

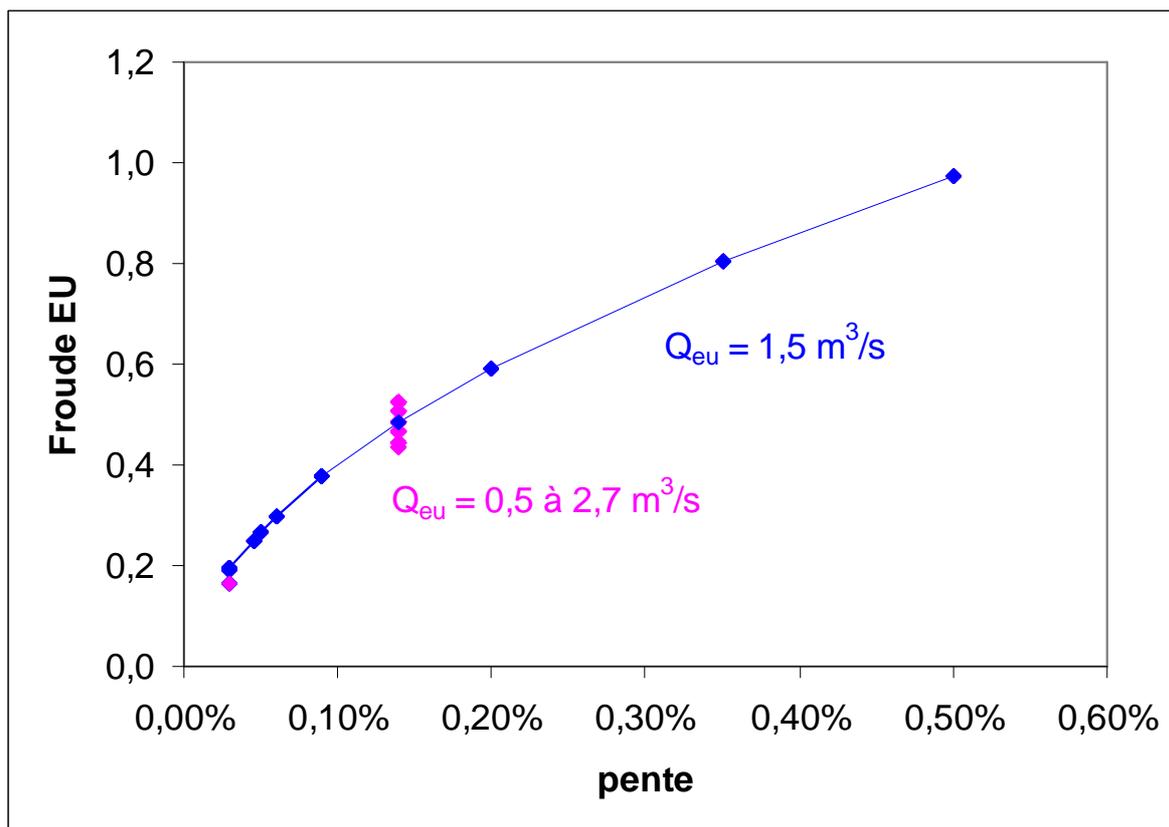


Figure 190 : Variations du nombre de Froude de l'écoulement initial en fonction de la pente pour l'ensemble des simulations

5.1.4.2 Rapport des vitesses min et max

Le paramètre α dépend d'une manière non linéaire (*Figure 191*) du rapport des débits d'eaux pluviales au débit d'eaux usées, ainsi que du débit d'eau usées, car celui-ci déplace la gamme de vitesse concernée par les variations de débit : quand le débit d'eaux usées augmente, les courbes vitesse-débit se déplacent vers les zones où du/dQ diminue, entraînant une augmentation du rapport u_{min}/u_{max} . Un effet analogue est observé avec la pente.

L'effet des paramètres précédents est fortement modulé par un autre paramètre : la durée de l'injection. Le mécanisme exact d'action la durée d'injection sur ces paramètres n'a pas pu

faire l'objet d'études spécifiques, mais c'est une première manifestation de l'effet de la durée d'injection, dont l'importance sera confirmée dans la suite.

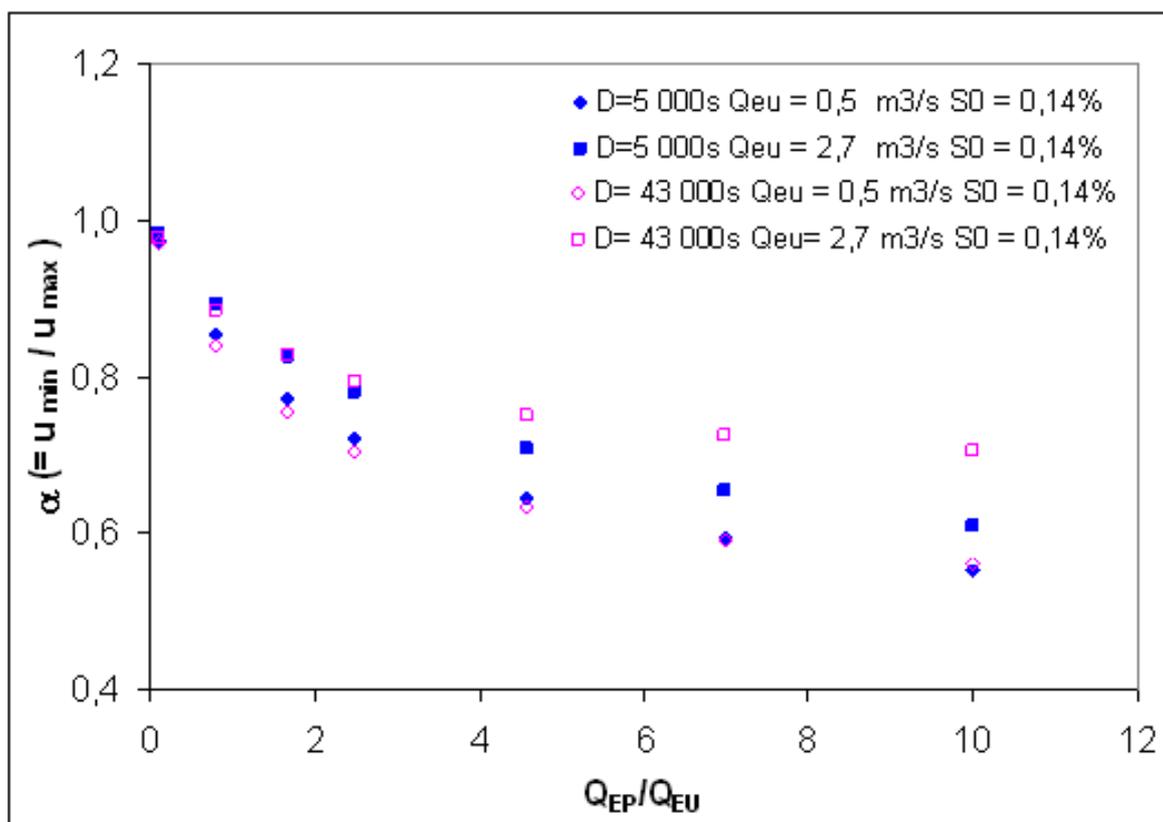


Figure 191 : Variations du facteur α en fonction de Q_{EP}/Q_{EU} pour quelques simulations à pente fixe ou variable : effet de la durée d'injection (couleur), du débit d'eau usées (symbole) et de la pente (étoiles)

5.2 Résultats et discussions

5.2.1 Temps de transfert

Dans la suite de ce chapitre, il ne sera plus question que de facteurs de décalage relatifs. Pour pouvoir rattacher ces facteurs à des données plus concrètes, ce paragraphe donne quelques indications sur les ordres de grandeurs concernés, en s'appuyant sur la *Figure 192* (temps de transfert) et la *Figure 193* (différence de temps de transfert).

Il apparaît que les temps de transfert, et que les comportements comparés de l'hydrogramme et du pollutogramme sont sensiblement différents pour les simulations à pente variable et à pente fixe.

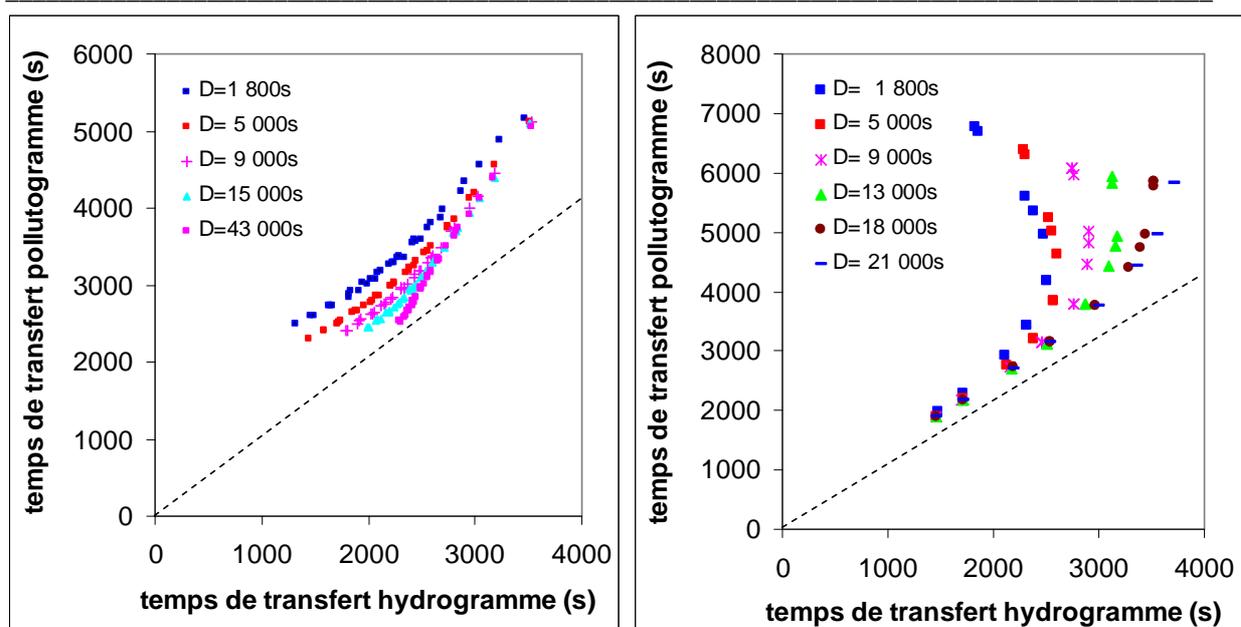


Figure 192 : Temps de transfert des hydrogrammes et des pollutogrammes pour toutes les simulations à pente fixe (0,14%) (à gauche) et pour toutes les simulations à pente variable (à droite)

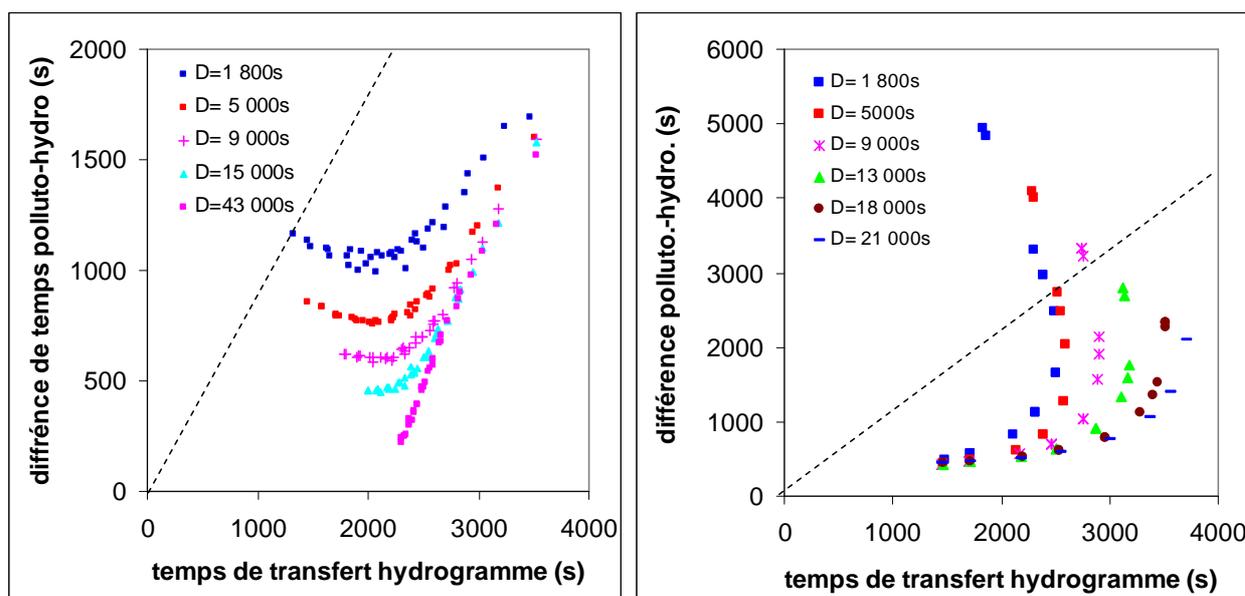


Figure 193 : Différences des temps de transfert en fonction des temps de transfert de l'hydrogramme pour toutes les simulations à pente fixe (0,14%) (à gauche) et pour toutes les simulations à pente variable (à droite)

A pente fixe les temps de transfert des concentrations varient dans une gamme homogène de 2 500 à 5 000s, alors que la gamme correspondante pour les débits varie avec la durée d'injection, de 1 200s - 3 500s pour une injection courte (30 mn), à 2 200s - 3 500s pour une

injection de plusieurs heures. Les différences de temps de transfert s'échelonnent entre 200s et 1 700s.

A pente variable la gamme couverte par les temps de transfert des concentrations d'étend de 1 800s à 5 700 - 7 000s (selon la durée de l'injection) et la gamme de débit de 1 500s à 3 500s. Les différences de temps de transfert s'échelonnent entre 400s et 5 000s.

Dans les deux cas les relations entre différences de temps de transfert, et temps de transfert du débit sont complexes, et dépend de la durée d'injection. Nous voyons donc l'intérêt potentiel de la définition d'un facteur de décalage pour simplifier la description de ces phénomènes.

5.2.2 Influence de la distance

La Figure 194 met en relation les facteurs de décalage $Fd_p(x)$ observés pour une même simulation à différentes abscisses ($x= 1\ 000\text{m}$, $2\ 000\text{m}$, $3\ 000\text{m}$, $4\ 000\text{m}$) avec le facteur de décalage observé à $5\ 000\text{m}$.

Comme prévu, $Fd_p(x)$ est à peu près égal à $Fd_p(5\ 000)$ (Figure 194) : il dépend peu de x sauf pour les très fortes valeurs de décalage, obtenues avec des faibles pentes et des durées d'injection courtes. Dans la suite, tous les résultats seront donnés pour $x= 5\ 000\text{m}$.

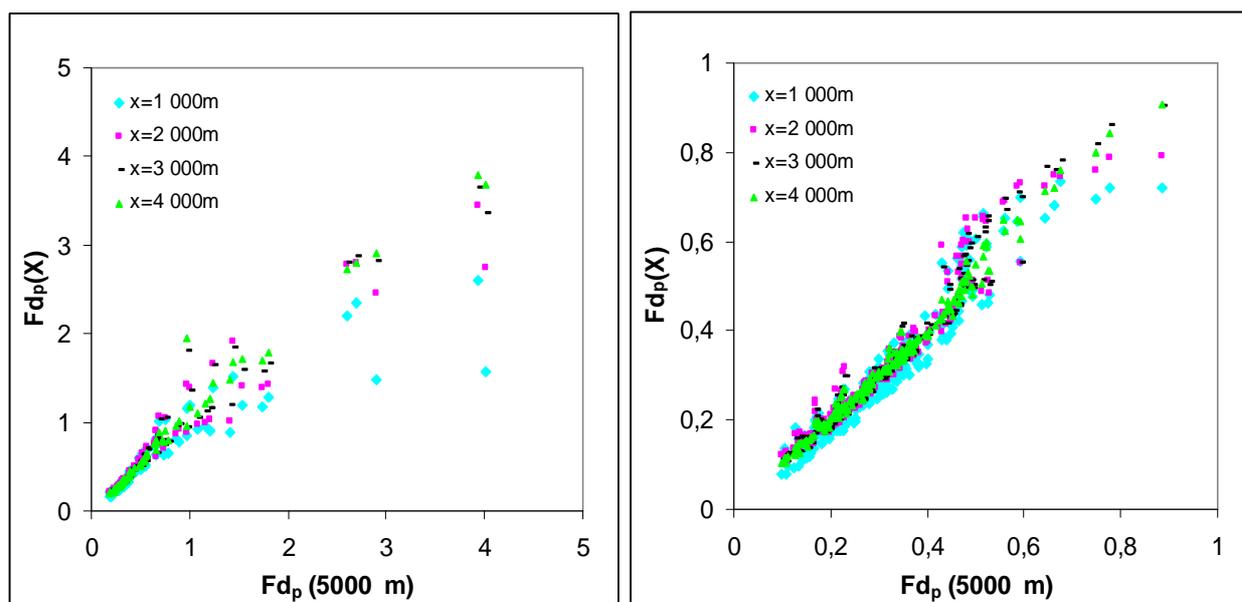


Figure 194 : valeurs de $Fd_p(x)$ à différentes distances en fonction de $Fd_p(5\ 000)$ à $5\ 000\text{m}$ pour toutes les simulations réalisées en faisant varier la pente (à gauche) et à pente fixe de 0,14% (à droite)

5.2.3 Valeur prédictive de Id_p

Les valeurs de Id_p obtenues pour les différentes simulations s'échelonnent entre 0,6 et 5, alors que les valeurs de $Fd_p(5\ 000)$ se répartissent dans un intervalle 0,1- 4.

La *Figure 195* montre que la valeur prédictive de Id_p est faible, du fait notamment de l'influence de la durée d'injection, mais aussi d'autres paramètres que nous nous attacherons à identifier dans les sections suivantes. Nous garderons cependant les facteurs intervenant dans Id_p (α et Fr) comme clé d'interprétation des résultats, car ces facteurs jouent a priori un rôle et ils permettent d'intégrer l'effet couplé de plusieurs paramètres.

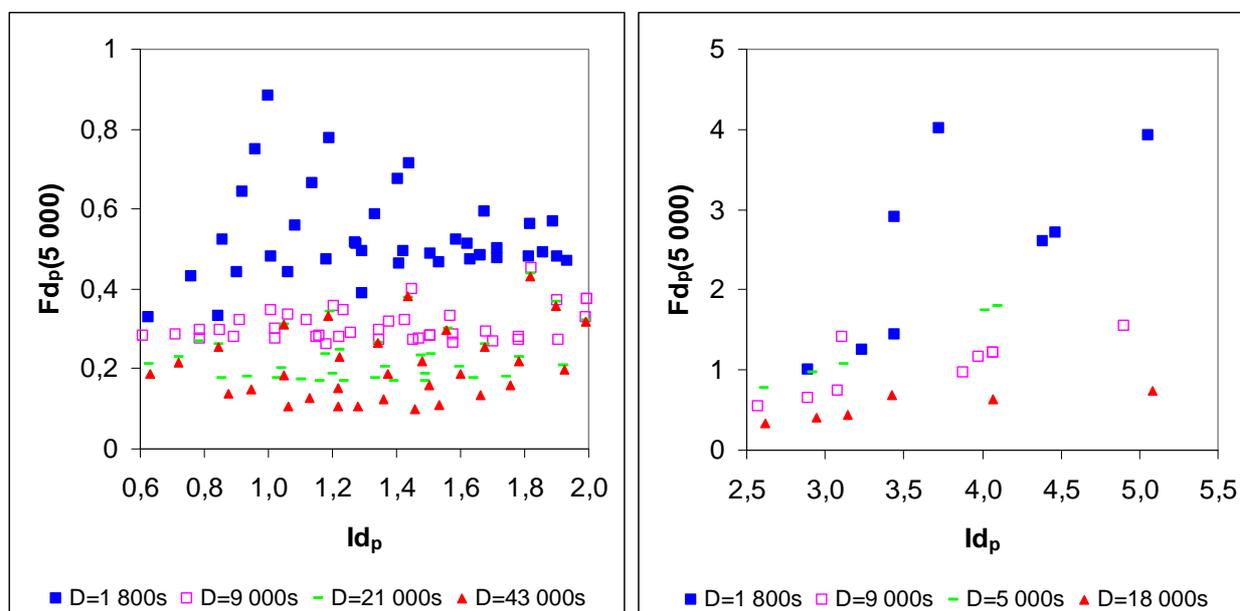


Figure 195 : Relations entre l'indice théorique de décalage des pointes Id_p et le facteur de décalage $Fd_p(5000)$ observé sur les différentes simulations à pente fixe (à gauche) et à pente variable (à droite)

5.2.4 Simulations à pente variable

Les simulations à pente variable avec Q_{EU} et Q_{EP}/Q_{EU} fixes permettent d'observer l'effet du nombre de Froude avec une influence du facteur α limitée : la *Figure 196* montre que ce facteur varie très peu, et que ses variations sont liées à celles du nombre de Froude. La simulation avec une durée d'injection de 1800 s se distingue des autres, avec des valeurs de α plus élevées et plus variables que pour les autres durées, mais cet effet reste limité.

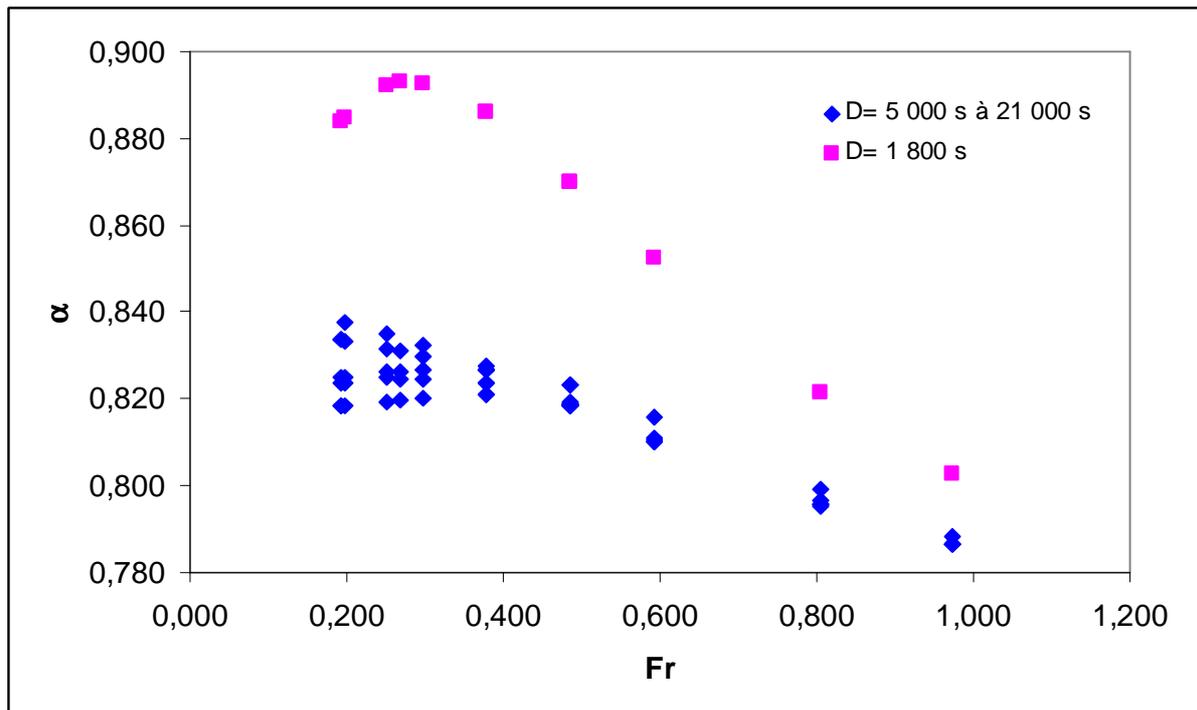


Figure 196 : Relation entre le facteur α et le nombre de Froude de l'écoulement initial pour les simulations effectuées à pente variable

La *Figure 197* montre les variations du facteur de décalage avec l'inverse du nombre de Froude en maintenant le facteur α constant (pour une même durée d'injection). On voit immédiatement que l'effet du nombre de Froude est très dépendant de la durée : il est très net pour les faibles durées, très atténué pour les durées supérieures à 9 000 s.

Pour les durées d'injection inférieures à 9 000 s, on obtient une relation croissante, mais non linéaire. Pour les durées supérieures, on observe une phase de stabilité, voire de légère décroissance pour les nombres de Froude compris entre 0,4 et 1, avant de retrouver une relation croissante avec $1/Fr$ pour les faibles nombres de Froude. Le décalage croissant avec l'inverse du nombre de Froude correspond à l'augmentation de la célérité avec le tirant d'eau initial, qui lui-même augmente lorsque la pente diminue.

L'influence du paramètre D est précisée par la *Figure 198*. Comme nous supputons que la durée intervient par l'intermédiaire de la vitesse de montée de l'hydrogramme, nous l'avons exprimée en calculant la valeur maximale (obtenue en début d'injection) de la dérivée en fonction du temps de la demi-sinusoïde injectée. Dans ce cas précis le débit injecté est constant et le calcul revient à multiplier $1/D$ par un facteur fixe. Les courbes obtenues sont paramétrées par le nombre de Froude de l'écoulement initial. On voit que les deux paramètres

considérés pourraient suffire à prédire les valeurs de $Fd_p(5\ 000)$ pour les séries de simulation réalisées.

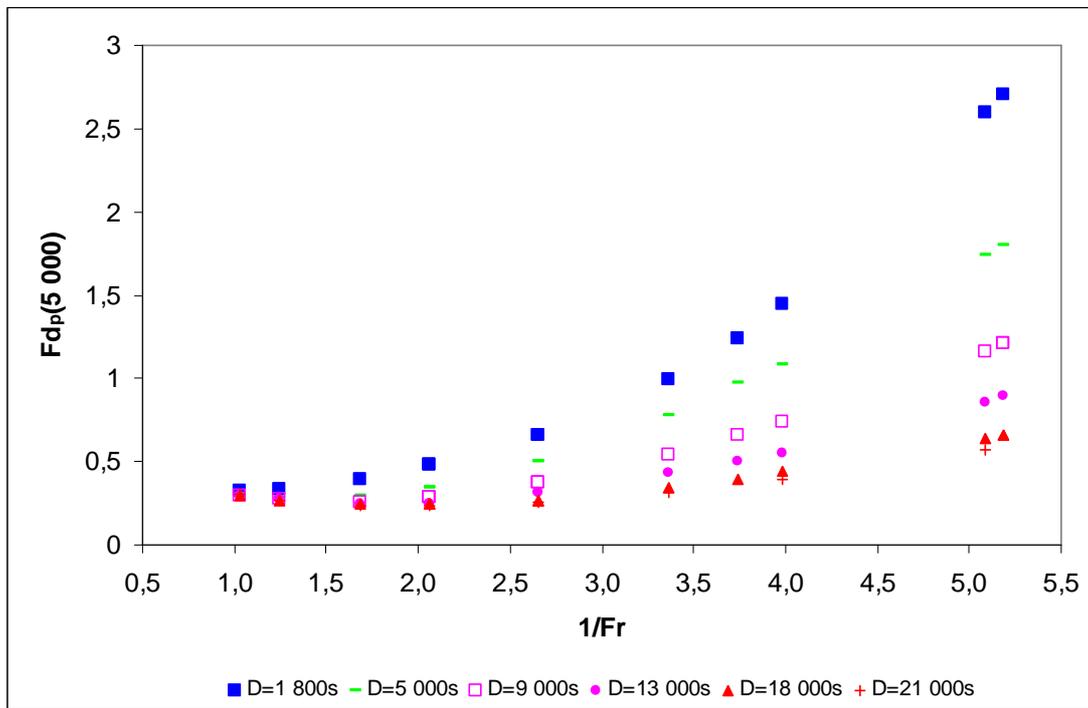


Figure 197 : Relation entre le facteur de décalage $Fd_p(5\ 000)$ observé lors des simulations à pente variable et le nombre de Froude de l'écoulement initial.

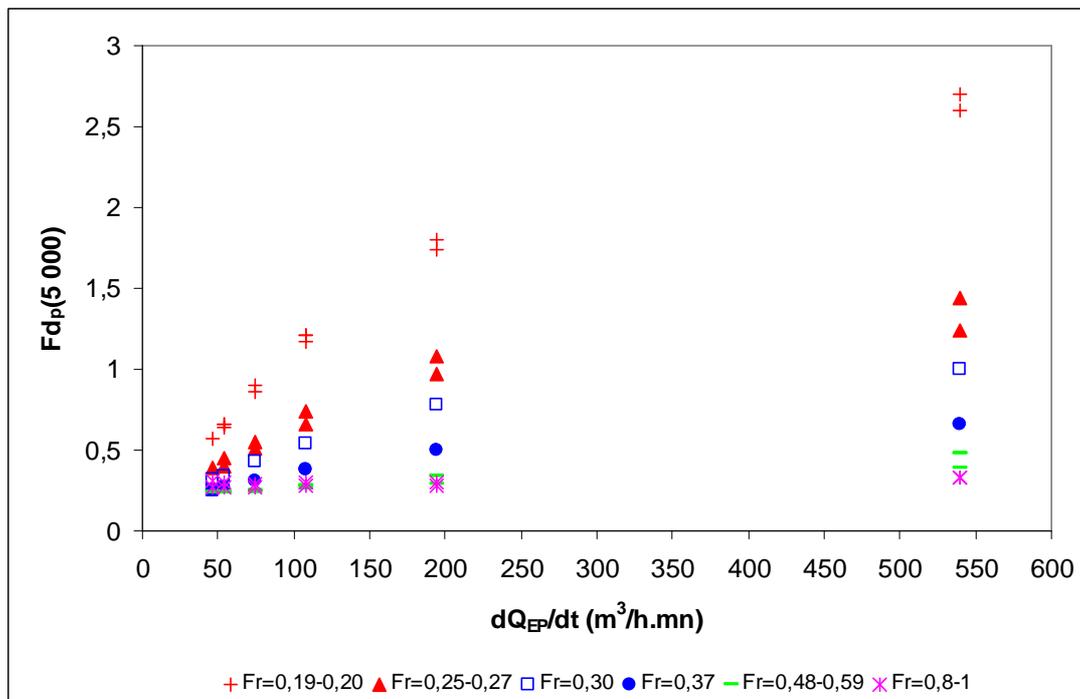


Figure 198 : Relations entre le facteur de décalage $Fd_p(5\ 000)$ observé lors des simulations à pente variable avec la vitesse initiale de montée de l'hydrogramme injecté en fonction du nombre de Froude de l'écoulement initial

5.2.5 Simulations à pente fixe et débits variables

5.2.5.1 Influence du facteur α rapport des vitesses min et max

Les simulations à pente fixe (0,14%) avec Q_{EU} et Q_{EP}/Q_{EU} variables permettent d'observer l'effet du facteur α avec une influence a priori limitée des variations de Fr , qui restent comprises entre 0,44 et 0,53.

5.2.5.2 Influence conjointe de α et de Fr

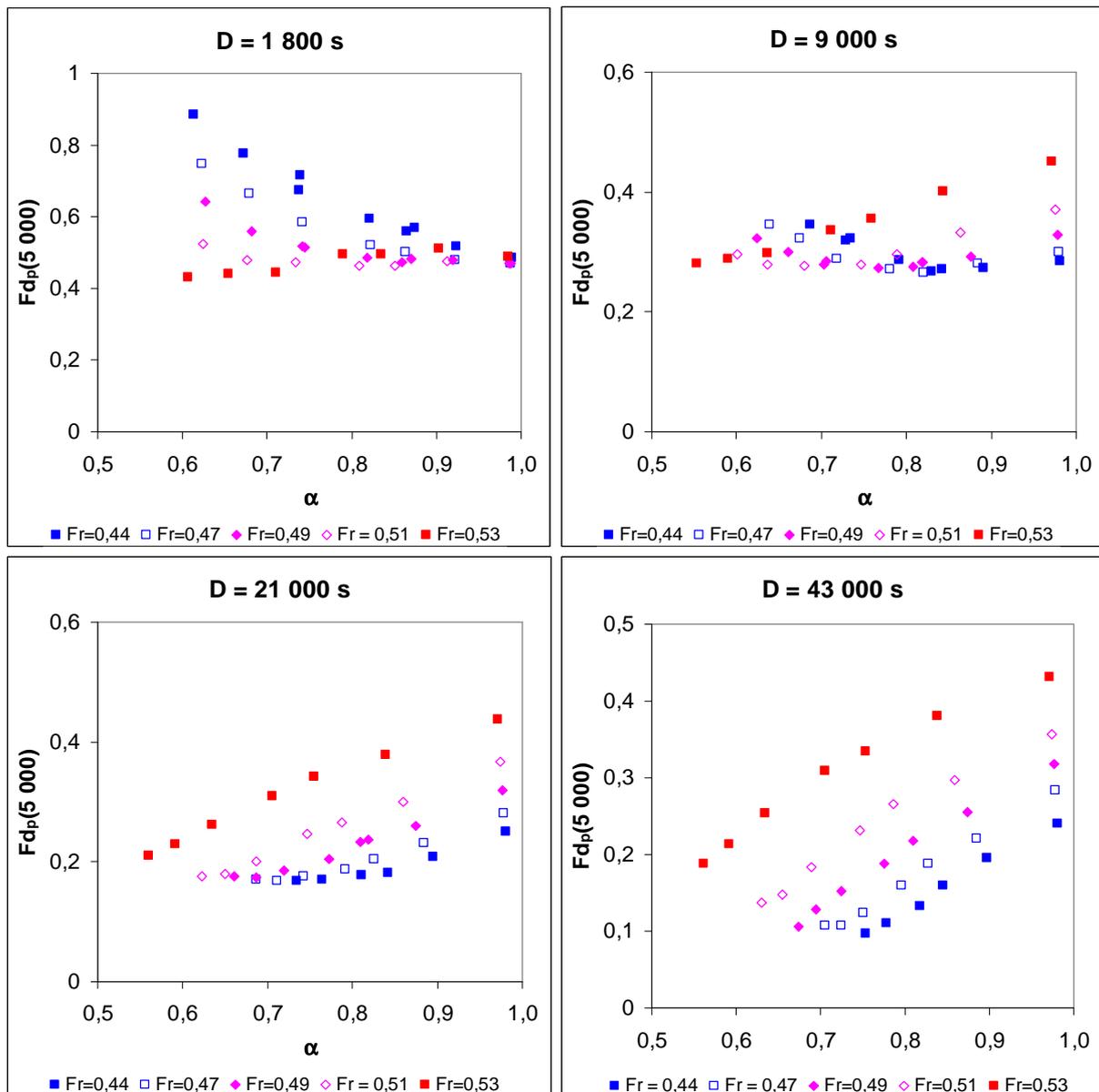


Figure 199 : Relation entre le facteur de décalage $F_{dp}(5\ 000)$ observé lors des simulations à pente fixe (0,14%), le facteur α rapport de la vitesse minimum à la vitesse maximum dans la section, et Fr le nombre de Froude de l'écoulement initial pour différentes durées d'injection

Si on étudie l'influence conjointe de α et de Fr pour une durée d'injection donnée (*Figure 199*), on constate que les faibles variations de Fr ont en fait une influence sensible. La connaissance de α et de Fr pourrait éventuellement permettre de prédire la valeur de $Fd_p(5\ 000)$, mais la durée d'injection influence fortement la réponse de $Fd_p(5\ 000)$ aux variations de α et de Fr . Pour les valeurs les plus élevées de D on constate que $Fd_p(5\ 000)$ croît simultanément avec $1/Fr$ et α , comme attendu d'après l'expression de l'indice Id_p , mais ce n'est plus le cas pour les valeurs de D inférieures à 13 000s. L'augmentation du décalage avec α correspondrait à la diminution de la vitesse d'advection mais ceci n'a pas pu être vérifié faute de temps.

5.2.5.3 Influence de la vitesse de montée de l'hydrogramme et du débit injecté

L'effet de la durée d'injection interagit avec celui du débit injecté pour définir la vitesse de montée de l'hydrogramme. On a vu précédemment (§5.2.4) que le facteur de décalage peut dépendre de cette vitesse de montée, mais aussi d'autres paramètres, tels que le nombre de Froude de l'écoulement initial, et, dans cette série de simulation à pente constante, avec la vitesse d'advection liée au débit injecté. Malgré de multiples tentatives il n'a pas été possible de trouver une formulation satisfaisante pour dissocier ces interactions et encore moins sous forme adimensionnelle. En particulier la vitesse de montée exprimée en variation de débit n'est qu'un indicateur de variations de tirant d'eau et de vitesse, qui elles-mêmes devraient être adimensionnalisées.

En revanche il apparaît que la vitesse de montée de l'hydrogramme exprimée en valeur absolue constitue un bon facteur explicatif du facteur de décalage, en particulier si on lui adjoint le débit de pointe d'eau injectée: les valeurs de débit les plus fortes produisent les décalages les plus faibles pour une vitesse de montées donnée. Sur la *Figure 200* on distingue des groupes de points assez homogènes, qui définissent des relations entre $Fd_p(5\ 000)$, dQ_{EP}/dt et Q_{EP} .

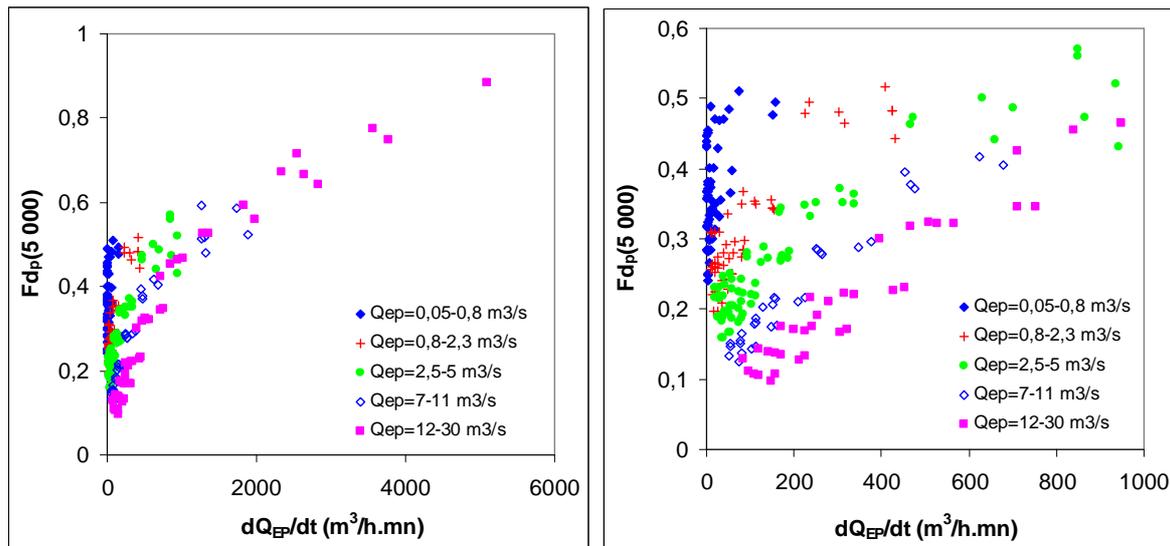


Figure 200 : Relations entre le facteur de décalage $Fd_p(5\ 000)$ observé lors des simulations à pente variable avec la vitesse initiale de montée de l'hydrogramme injecté pour différentes valeurs du débit total maximum (gamme complète à gauche, zoom sur la gamme 0-1 000 $m^3/h.mn$ à droite)

Le mode d'action du débit injecté reste à élucider. Il ne semble pas que la modification de la vitesse d'advection joue un rôle essentiel, comme le montre la comparaison entre la *Figure 201a* et la *Figure 201b* : l'effet très net du débit total n'apparaît pas sur la figure de droite où le débit total est remplacé par le rapport V_{min}/V_{max} . Le rapport Q_{EP}/Q_{EU} ne semble pas non plus déterminant (*Figure 202*). En revanche les alignements de points que l'on distingue sur la *Figure 201a* correspondent à des mêmes durées d'injection.

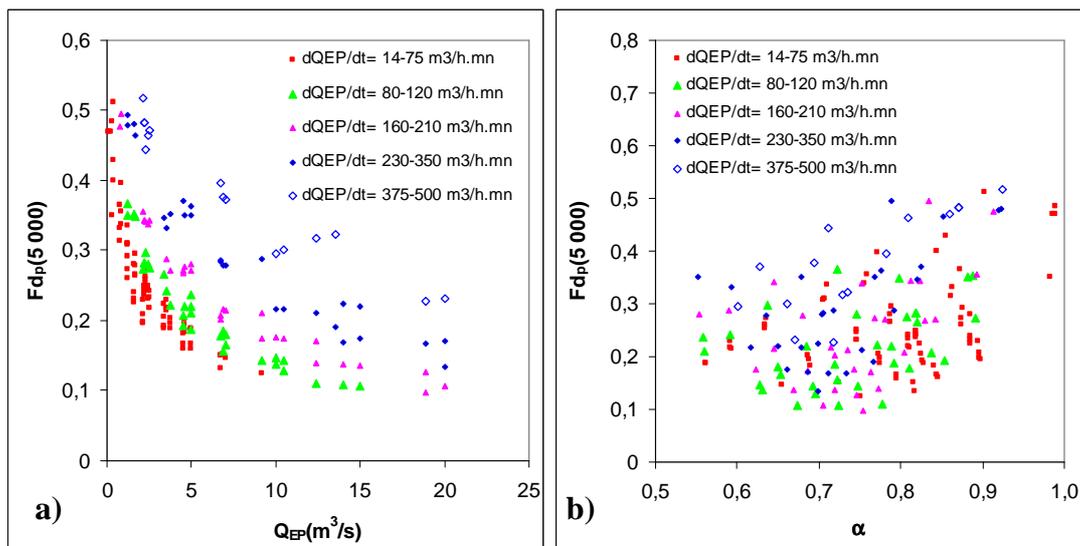


Figure 201 : Relations entre le facteur de décalage $Fd_p(5\ 000)$ observé lors des simulations à pente variable avec la débit total maximum (a) à gauche) ou la rapport V_{min}/V_{max} (b) à droite), pour différentes valeurs de la vitesse initiale de montée de l'hydrogramme

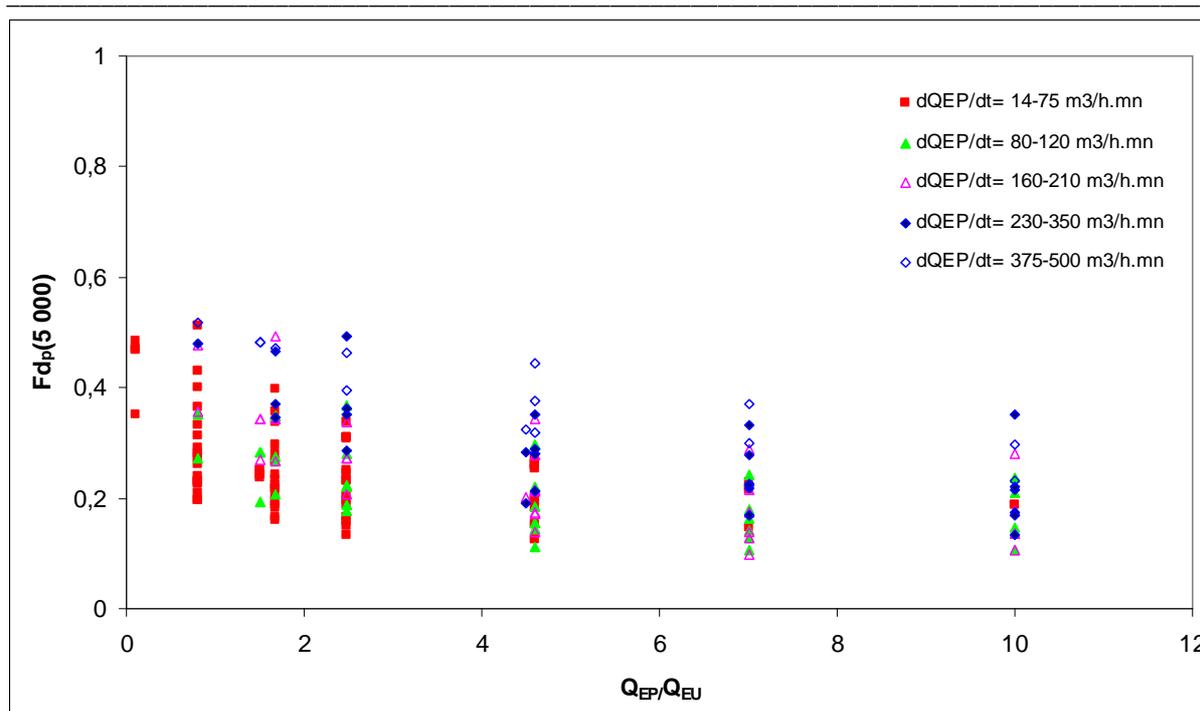


Figure 202 : Relations entre le facteur de décalage $Fd_p(5\ 000)$ observé lors des simulations à pente variable avec le rapport du débit maximum injecté au débit permanent pour différentes valeurs de la vitesse initiale de montée de l'hydrogramme

5.3 Synthèse

La Figure 203 résume les résultats obtenus pour l'ensemble des simulations, à pente fixe ou à pente variable. On voit que les gammes de paramètres couvertes par les deux types de simulations sont très différentes. Les simulations à pente variable (§5.2.4) ont permis de bien appréhender l'influence de l'écoulement initial, caractérisé par son nombre de Froude, en combinaison avec la vitesse de montée de l'hydrogramme injecté : les valeurs du nombre de Froude les plus faibles impliquent un tirant d'eaux usées et donc une célérité élevée, et conduisent à un décalage important entre hydrogramme et pollutogramme. Des vitesses de montées de l'hydrogramme élevées conduisent au même résultat par des voies qui restent à préciser.

Les simulations à pente fixe ont permis de parcourir une gamme beaucoup plus large de vitesse de montée, en faisant varier la durée et l'amplitude de l'injection, mais en restant dans une gamme restreinte de valeurs de Fr . L'influence de la vitesse de montée de l'hydrogramme est confirmée, surtout pour les valeurs les plus élevées correspondant aux durées d'injection les plus courtes, mais apparaît (§5.2.5.3) que la valeur du débit injecté a également une influence propre, indépendante de son action sur la vitesse de montée gradient. Cette influence est due à l'augmentation de la vitesse d'advection de la masse injectée. Le rapport

du débit injecté au débit d'eaux usées pourrait également jouer un rôle, par l'intermédiaire des volumes mis en jeu.

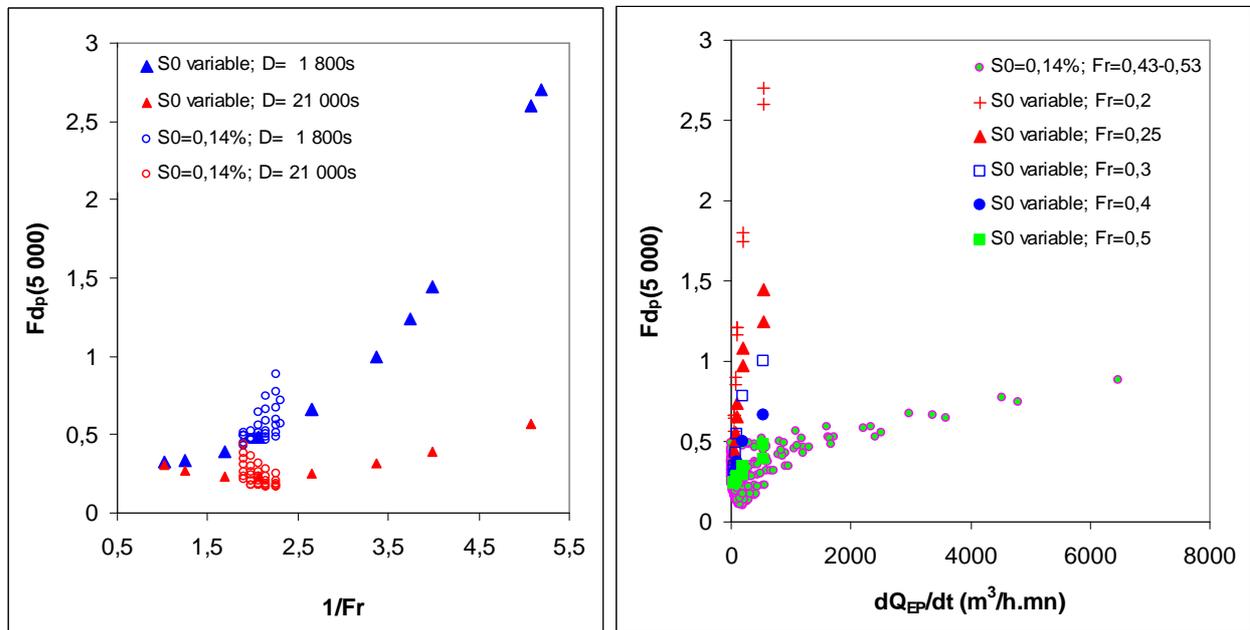


Figure 203 : Synthèse des résultats obtenus lors des simulations à pente fixe et à pente variable.

a) Influence du nombre de Froude de l'écoulement initial (« eau usée »)

b) influence de la vitesse de variation du débit injecté (« eau pluviale »)

Les travaux futurs devront se concentrer sur ces trois éléments (écoulement initial, importance absolue et relative de l'injection, dynamique de l'injection) pour les caractériser d'une manière prédictive vis-à-vis du facteur de décalage et transposable à d'autres configurations d'écoulement.

6 CONCLUSION

Ce chapitre exploratoire a permis de progresser dans la compréhension des phénomènes de décalage temporel entre hydrogramme et pollutogramme et d'effet piston. Ces phénomènes sont les deux manifestations d'un même mécanisme, à savoir la « compression » puis l'accélération de l'eau présente dans la canalisation à l'avant du volume injecté. Ce mécanisme propage le front (ou l'onde) de débit avec une célérité supérieure à la vitesse d'advection de la masse injectée. Cette onde de débit a une concentration égale à celle qui était initialement présente dans la canalisation, par exemple celle des eaux usées, et on peut donc observer une augmentation de flux sans variation de concentration : c'est l'effet piston.

La définition d'un facteur de décalage adimensionnel et assez indépendant de l'abscisse de la section d'observation a permis de réaliser une étude de sensibilité et de l'interpréter en s'appuyant sur une analyse théorique très simplifiée. Parmi les facteurs explicatifs testés, la pente ou le nombre de Froude de l'écoulement initial ont une grande influence sur le décalage temporel entre les pointes de l'hydrogramme et du pollutogramme. Ces facteurs déterminent la célérité de propagation de l'onde de débit et leur effet était prévisible, au moins qualitativement.

L'influence décisive de la durée de l'hydrogramme injecté, ou plutôt de la vitesse de variation de débit qui lui est associée, était prévisible, mais son étude théorique n'a rien de trivial. Cette influence a pu être quantifiée en valeur absolue (conjointement avec le débit maximum injecté) mais aucune expression adimensionnelle n'a pu être identifiée.

Le rapport de vitesses ($\alpha = V_{\min}/V_{\max}$) testé n'a pas eu les capacités explicatives escomptées, d'autant plus qu'il varie relativement peu, et sous l'influence de multiples paramètres (Q_{EU} , Q_{EP}/Q_{EU} , $S0$, durée d'injection). On peut déceler des variations du facteur de décalage en fonction de α , mais les interactions avec le nombre de Froude et la durée d'injection déterminent fortement ces relations. Il est possible que les approximations qui ont abouti à la définition de ce rapport se soient trop éloignées de la réalité des phénomènes : même dans le cas très simple que nous avons étudié, les vitesses observées dans une section ne suffisent peut-être pas à représenter l'ensemble des valeurs qui ont déterminé la propagation de l'hydrogramme et du pollutogramme du point d'injection jusqu'à cette section dans toutes les conditions de simulation. Il se peut également qu'un raisonnement basé exclusivement sur des vitesses et des célérités atteignent leurs limites lorsque les hydrogrammes à propager représentent des volumes importants vis-à-vis du volume disponible à l'aval du point d'injection : le rapport Q_{EP}/Q_{EU} s'est avéré explicatif pour certaines simulations.

En perspectives, une analyse plus hydraulique des phénomènes sera nécessaire pour comprendre les interactions entre paramètres et leurs effets sur les temps de transfert du pollutogramme d'une part, et de l'hydrogramme d'autre part. Elle devra s'appuyer sur une gamme de simulations adaptée et étendue (notamment en faisant varier la largeur et la forme du canal, pour dissocier les effets de vitesse et de tirant d'eau et vérifier la capacité explicative du nombre de Froude). Un premier objectif sera de mieux cerner l'effet de la dynamique de l'hydrogramme injecté, en termes de tirant d'eau et de vitesse, et de le paramétrer par des

facteurs adimensionnels. D'autre part il s'agira de vérifier notamment par des bilans de matière si le volume d'eau initialement présent dans le canal est susceptible d'être un facteur limitant à la célérité de propagation du débit, en fonction du débit ou du volume injecté.

Enfin la mise au point d'une représentation graphique pédagogique permettant de visualiser l'évolution des masses d'eau et de leur vitesse serait très utile pour faciliter l'assimilation de ces phénomènes difficiles à appréhender intuitivement.

De plus, une fois la configuration d'un collecteur unique avec une injection unique est maîtrisée, on pourra alors passer à l'étude d'apports répartis et de systèmes ramifiés.

Une fois résolu le problème direct du transfert, il restera à aborder la question de l'inversion en termes de transfert et de production. Ce chapitre nous a déjà fourni quelques indications.

La première est que la différence de temps de transfert entre concentration et débit peut induire des phénomènes de type « first flush » (effet piston) ou « last flush » (eaux pluviales plus polluées que les eaux usées) en termes de flux, mais pas en termes de concentration. On aura donc intérêt de conduire les analyses de transfert en termes de concentration plutôt qu'en flux (à condition d'avoir une idée sur la concentration à la production), afin de neutraliser l'effet piston. Si on veut interpréter des flux, il faudra de réaliser des analyses qui permettent de discriminer les particules des eaux usées de celles des dépôts ou des eaux de ruissellement.

Le deuxième résultat est que les différences de temps de transfert entre concentration et débit sont très sensibles dans la configuration étudiée : une avance de la concentration sur le débit ne peut être associée qu'à une source proche, dont le débit propre serait masqué par la suite de l'hydrogramme du bassin versant. Plus généralement la prise en compte des phénomènes de transfert parallèlement à ceux de production pourrait s'avérer essentielle pour comprendre et prédire la dynamique des flux polluants à l'échelle intra-événementielle. Ce point reste cependant à confirmer pour des configurations de réseau plus réalistes que celle qui a été étudiée dans ce chapitre.

Enfin la vitesse de montée de l'hydrogramme apparaît comme un paramètre clé pour interpréter ces phénomènes de transfert : les vitesses les plus grandes induisent les décalages les plus importants, surtout pour les événements de faible amplitude.