

# **Interprétation au moyen de temps caractéristiques de l'écoulement symétrique et asymétrique dans des bassins rectangulaires**

Mémoire présenté par  
**Tom Adam**

en vue de l'obtention du grade de master en  
**Ingénieur civil des constructions**

Promoteurs  
**Éric Deleersnijder et Benjamin Dewals**

Lecteurs  
**Pierre Archambeau, Sandra Soares-Frazao, Miltiadis Papalexandris**

Année académique  
**2016-2017**

## Remerciements :

Tout d'abord, je tiens à remercier M. Eric Deleersnijder, professeur à l'Université catholique de Louvain et promoteur de ce mémoire, pour le temps consacré à ce sujet de fin d'études et plus encore à sa façon de procéder. En effet, les relations visant à élaborer un travail de recherche peuvent s'avérer complexes et je fus heureux de constater que la notoriété et le système hiérarchique n'entravent pas nécessairement les relations humaines, chose qui, pour certains, pourrait s'avérer futile mais qui est pour moi primordiale.

Je tiens également à remercier le second promoteur de ce mémoire, M. Benjamin Dewals et les membres de son équipe, plus particulièrement M. Pierre Archambaud, pour leur aide et leur réactivité exemplaire aux problèmes rencontrés.

Enfin, je terminerai ces remerciements en citant d'une part François Dederichs, ami et camarade d'études qui m'a toujours épaulé dans les domaines pour lesquels j'avais moins d'affinités mais aussi Alexandre Mortier qui aura été une de mes plus belles rencontres au cours de mon parcours universitaire et dont le soutien sans faille m'aura permis de finaliser ces études.

## Résumé:

Ce mémoire relit la théorie de l'âge qui, via une échelle de temps, permet de caractériser le mouvement de fluide de manière inusuel, à des travaux et réflexions développés par l'Université de Liège concernant des bassins rectangulaires de sédimentations.

Ce travail décrit en premier lieu l'outil d'analyse, « *CART : the Constituend-oriented Age and Residence time Theory » qui s'avère être le fondement de la théorie de l'âge. Il s'ensuit une mise en contexte de l'application de ce dernier à travers les domaines étudiés et de réflexions sur la compatibilité de la méthode utilisée dans ces bassins rectangulaires.*

La partie centrale du travail porte sur l'observation des résultats recueillis en tenant compte des analyses effectuées au cours de travaux antérieurs de l'Université de Liège dont un nombre important provient de la caractérisation de l'écoulement dans de tels bassins.

Ce mémoire se veut être un premier pas vers la caractérisation de l'écoulement dans des bassins rectangulaires à travers une vision différente du problème.

## Table des matières

1. Introduction.....	6
2. Présentation de l’outil d’analyse.....	10
2.1 Description de CART.....	10
2.2 Equations constitutives de l’âge.....	12
2.2.1 Hypothèses de base.....	12
2.2.2 1 <sup>re</sup> équation constitutive : concentration.....	13
2.2.3 2 <sup>eme</sup> équation constitutive : la concentration d’âge.....	17
3. Exploitation de l’outil d’analyse, CART.....	19
3.1 Description de la problématique.....	19
3.2 Equations analytiques à travers le domaine étudié.....	22
3.2.1 Interprétation du phénomène.....	22
3.2.2 Construction de conditions aux limites compatibles.....	24
4. Modélisation numérique.....	28
4.1 Logiciel WOLF.....	28
4.2 Résolution de l’équation de la moyenne d’âge.....	29
4.3 Résultats des simulations numériques.....	32
4.3.1 Calcul de l’âge sans tenir compte de la diffusion.....	32
4.3.2 Calcul de l’âge avec un tenseur de diffusion constant.....	33
4.3.3 Calcul de l’âge avec un tenseur de diffusion variable spatialement.....	35
4.3.3 Test de sensibilité à la diffusion.....	38
5. Observation et interprétation des résultats.....	40
5.1 Observation pour une longueur fixée.....	40
5.2 Observation pour une largeur fixée.....	42
5.3 Impact de la géométrie sur le type d’écoulement.....	44
5.4 Interprétation des résultats.....	49
5.4.1 Configuration L600_B400 – type A1.....	50
5.4.2 Configuration L400_B200 - type A1.....	53
5.4.3 Configuration L400_B100 – type A1.....	55
5.4.4 Configuration L600_B100-Type A2.....	57
5.4.5 Configuration L600_B075-Type A2.....	60
5.4.7 Configuration L580_B400-Type S0.....	64
5.4.8 Configuration L530_B400-Type S0.....	66
5.4.9 Configuration L500_B400-Type S0.....	68
5.4.10 Configuration L400_B300-Type S0.....	70
5.4.11 Configuration L300_B400-Type S0.....	72

6. Pertinence et intérêts des résultats .....	74
6.1 Pertinence .....	74
6.2 Intérêts .....	77
7. Piste d'amélioration .....	81
8. Conclusion .....	82
9. Références .....	83

## 1. Introduction

Dans le cadre de ce travail de fin d'études, la problématique consiste à caractériser les différents types d'écoulements observés dans des bassins de formes rectangulaires. Ce type de formes constitue une configuration idéale pour visualiser individuellement les processus qui s'y présentent. Par ailleurs, il s'agit de structures communes à de nombreux ouvrages hydrauliques et à des environnements naturels.

La majeure partie d'entre eux appartient à l'une des deux catégories présentées ci-dessous :

- Des bassins de rétention

Ils sont destinés à contenir le surplus d'eaux de pluie et de ruissellement généré par l'urbanisation ou l'aménagement d'un site en fonction d'un débit d'évacuation régulé vers un exutoire. Leurs utilisations sont diverses. Ils jouent un rôle de tampon afin d'éviter la saturation des réseaux d'assainissement et le débordement des déversoirs en cas d'orage. Un tel stock d'eau peut s'avérer utile pour la défense contre des incendies. Ces bassins réservoirs peuvent être à ciel ouvert ou enterrés (voir respectivement figure 1 et figure 2).



Figure 1 : Bassin de rétention près du village d'Heuringhem en France



Figure 2 : Bassin de rétention enterré

- Des bassins de sédimentation

Ils désignent un dispositif de traitement des eaux qui a pour but de diminuer la charge de particules en suspension dans les cours d'eau récepteurs. Un exemple est présenté ci-dessous (figure 3) :



Figure 3 : Bassins de décantation utilisés dans une carrière de granulats

Une sédimentation réfléchi dépendra du type d'écoulement de ces bassins. Différentes études ont donc été réalisées en vue de modéliser au mieux ces circulations d'eaux. Bien que les modèles soient de plus en plus précis, des incohérences subsistent encore entre la réalité et les modèles théoriques.

L'objectif de la présente vise à apporter une vision différente de l'écoulement régnant dans ces bassins grâce à la théorie de l'âge : « *CART : the Constituend-oriented Age and Residence time Theory* ». Cet outil d'analyse holistique fut développé pour caractériser un écoulement via l'échelle de temps telle que le temps de résidence ou l'âge. Ces notions, qui seront davantage explicitées par la suite, sont relatives à celle du temps écoulé ce qui, dans notre situation de domaine semi-fermé, permet de visualiser le taux de renouvellement de l'eau.

Un exemple d'application de cette théorie est la caractérisation par l'âge de la ventilation de l'eau se déroulant dans la couche supérieure du lac Tanganyika. Effectivement, le renouvellement de l'eau à travers la thermocline en alternance avec les saisons sèches et humides ne peut pas se visualiser à long terme par l'évolution de la concentration d'un traceur. Ce traceur passif représente l'eau de renouvellement qui provient de la couche inférieure du lac (voir figure 4).

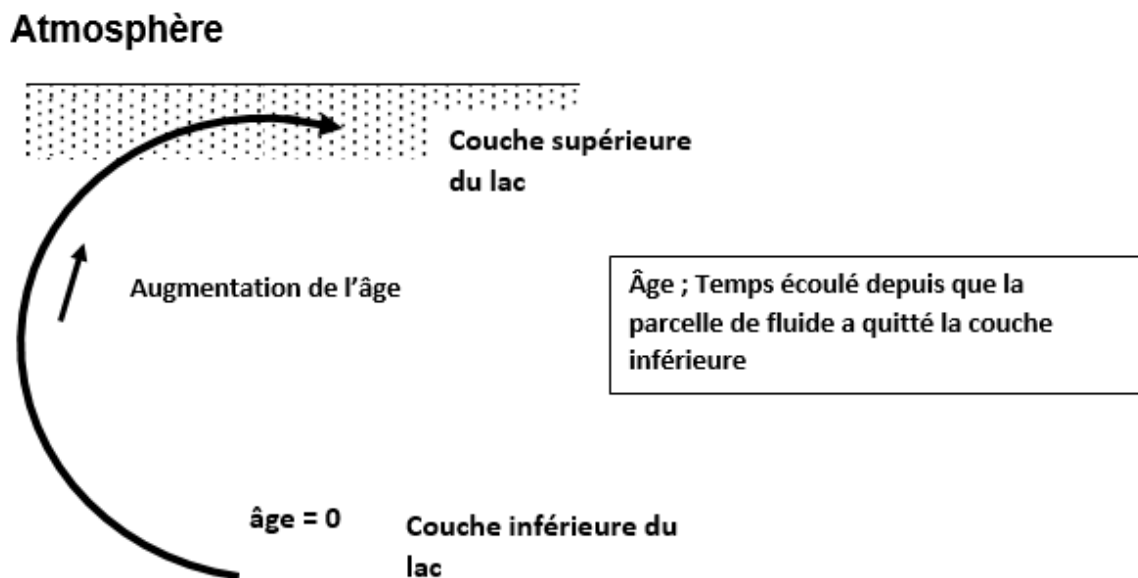


Figure 4 : Représentation schématique du mouvement du fluide entre la couche inférieure et supérieure

Le lac Tanganyika, à l'inverse des bassins sujets de la présente étude, est un système fermé soumis au phénomène de ventilation. Cet exemple d'application de l'âge n'a ici que pour seul objectif de démontrer une des forces de l'outil d'analyse étant la visualisation à long terme du phénomène. Les principes de base restent malgré tout identiques à ceux utilisés dans cette étude.

Les figures suivantes démontrent que l'évolution de la concentration du traceur passif tend vers l'unité, ce qui indique la saturation du bassin.

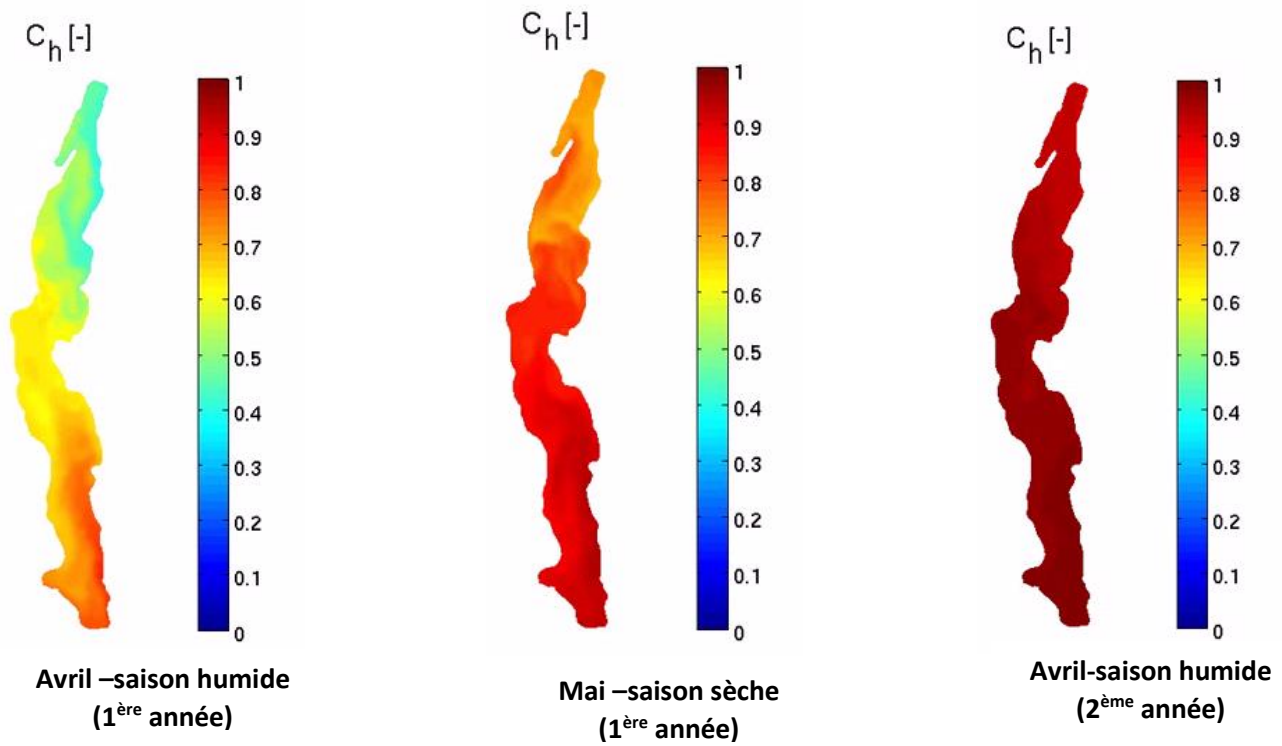


Figure 5 : Distribution de la concentration d'un traceur passif au sein du lac Tanganyika

La figure 5 souligne la limite de la caractérisation du phénomène par l'évolution d'un traceur passif relâché dans le domaine. Après un certain laps de temps, le bassin sera saturé ce qui signifie que la concentration du traceur sera maximale dans l'entièreté du lac et qu'il ne sera désormais plus possible de procéder à des observations d'après ce paramètre.

A l'inverse, la caractérisation du fluide par l'âge permet de visualiser le phénomène à long terme, comme le suggère la figure 6 reprise à la page suivante, représentant l'évolution de l'âge des parcelles de fluides après plusieurs années. Elle donne ainsi l'opportunité d'étudier le phénomène dans un laps de temps illimité.

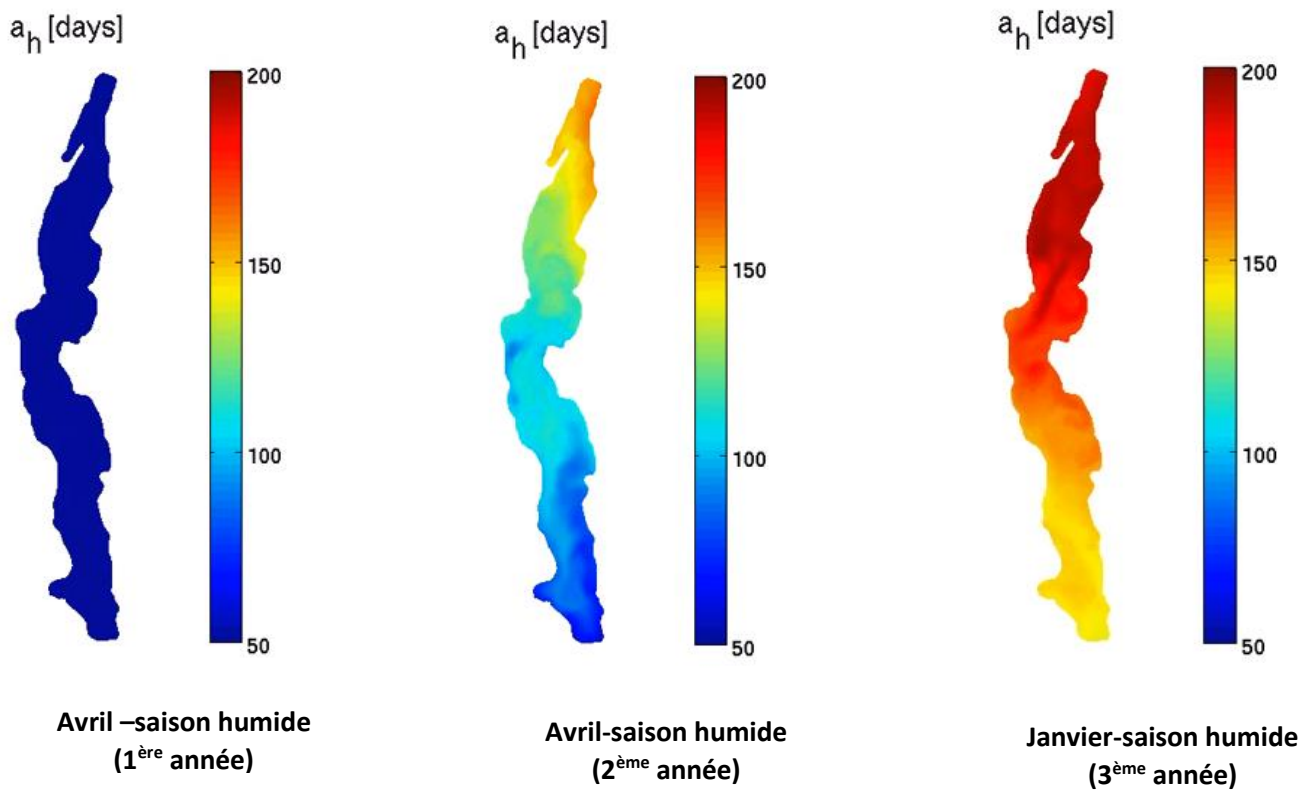


Figure 6 : Distribution de l'âge des parcelles de fluide au sein du lac Tanganyika

## 2. Présentation de l'outil d'analyse, CART: "The Constituent-oriented Age and Residence time Theory "

### 2.1 Description de CART

La description de certains types d'écoulements peut s'avérer complexe et il est parfois difficile d'obtenir des interprétations pertinentes par « la simple » interprétation de « variables primitives » propres aux modèles communément utilisés en hydraulique (vitesse, hauteur d'eau, etc.). Il est dès lors nécessaire d'estimer des variables auxiliaires à celles-ci pour compléter la compréhension des phénomènes étudiés.

C'est dans ce but que la théorie de l'âge a été développée. Cette dernière a fait ses preuves dans deux domaines spécifiques : l'estimation de la ventilation des océans et la circulation horizontale des mers continentales. L'attention de la théorie de l'âge porte sur l'état des particules constituant le fluide étudié.

Plusieurs définitions de l'âge ont été données mais toutes s'accordent à le définir comme la mesure d'un temps écoulé. Nous retiendrons celle énoncée par Delhez et al. (1999a): « *the age of a particle of a constituent of seawater is regarded as the time elapsed since the particle under consideration left the region in which its age is prescribed to be zero* ».

L'application à notre situation serait de considérer l'entrée du bassin comme la région où l'âge des particules est fixé à zéro et de mesurer le temps écoulé jusqu'à ce que la particule considérée arrive à l'endroit où on l'observe à un moment donné. Une vulgarisation de ce concept est d'imaginer un chronomètre placé sur chaque particule d'eau entrant dans le bassin. On démarre alors celui-ci lorsque la particule y entre et on le stoppe à la sortie. Nous pourrions ainsi observer la répartition de l'âge des particules dans le bassin en fonction du temps.

Il est évidemment impossible d'étudier chaque particule indépendamment. C'est pourquoi nous parlerons de parcelle de fluide, un volume très petit ayant une vitesse égale à la moyenne des vitesses des particules le constituant. La taille de ce dernier doit être beaucoup plus petite que l'ordre de longueur de l'écoulement étudié et beaucoup plus grand que la distance séparant des particules du fluide. Ce volume, dit infinitésimal, est suffisamment petit pour justifier la notion de dérivée d'une grandeur macroscopique mais suffisamment grand afin que les interactions entre molécules puissent être regroupées statistiquement.

Le point de vue de la parcelle de fluide fait alors éclore un problème important. En tenant compte de la diffusion au sein du fluide, la parcelle de fluide ne pourra pas être considérée comme isolée de son environnement. Il y aura des flux de matière entrant et sortant de la parcelle (voir figure 7), ce qui implique que la parcelle de fluide sera composée de particules d'âges différents. De plus, les processus de destruction et de production accentueront la disparité de l'âge des particules au sein de la parcelle.

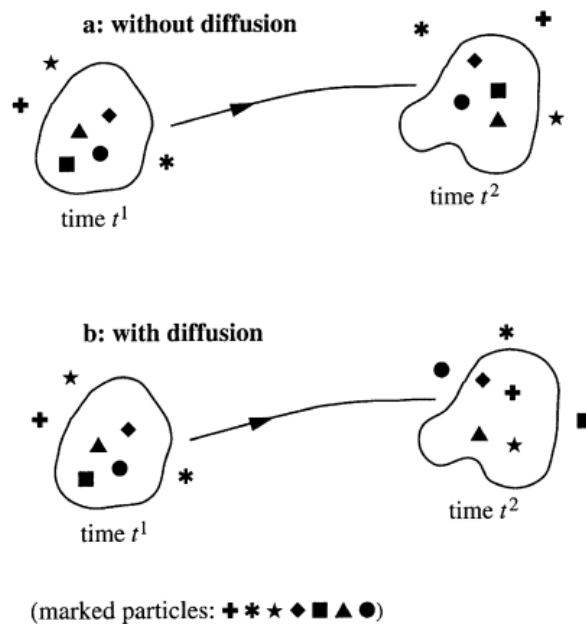


Figure 7 : illustration schématique du déplacement d'une parcelle de fluide entre deux instants  $t^1$  et  $t^2$ , constituée de particules marquées. Sans diffusion (a), la parcelle de fluide est isolée de son environnement, il n'y a donc aucun changement au niveau de la constitution de la parcelle. En tenant compte de la diffusion (b), la parcelle de fluide considérée échange de la matière avec son environnement.

Pour prendre en compte ces problèmes, Delhez et al. (1999a) ont complété la définition de l'âge. Nous pouvons en citer les trois principales caractéristiques :

1. *The age of every constituent of seawater can be evaluated as well as that of suitably defined groups of constituents*
2. *The age of every constituent depends on time and position*
3. *Advection, mixing and production/destruction processes are properly accounted for*

Comme spécifié précédemment, il est nécessaire de prendre en considération qu'une parcelle de fluide sera composée de particules d'âges différents à travers le temps de par les phénomènes de diffusion et de production/destruction. Il fut par conséquent nécessaire d'appliquer une méthode spécifiant la distribution de l'âge dans les différentes parcelles de fluide.

Dans ce but, l'inspiration de travaux antérieurs (e.g. Bolin and Rodhe 1973 ; Dronkers and Zimmerman, 1982 ; Hall and Plumb, 1994 ; Holzer and Hall, 2000) a entraîné l'utilisation d'une fonction de distribution de la concentration.

## 2.2 Equations constitutives de l'âge

### 2.2.1 Hypothèses de base

Chaque parcelle de fluide est constituée de différentes particules. Nous identifierons ses multiples constituants par l'index « i » ( $0 \leq i \leq I$ ). Le constituant désignant l'eau pure correspondra à  $i = 0$  ; ceux représentant des particules actives, à savoir celles qui réagissent avec leur environnement et concernent les phénomènes de production/destruction, seront identifiées par l'index « r ». Les particules n'interagissant pas avec l'environnement - les traceurs passifs - seront quant à elles désignées par l'index « p ».

L'approximation de Boussinesq sera prise en compte comme dans de nombreux développements hydrauliques. Cela signifie que la densité (masse par unité de volume) du fluide sera considérée comme constante vu sa très faible variation. En effet, dans un environnement aquatique, l'eau est de loin le constituant dominant contenu dans une parcelle de fluide. La densité de ce mélange varie respectivement pour l'eau pure et l'eau de mer à une grande profondeur entre :

$$1000 \text{ kg/m}^3 < \rho < 1050 \text{ kg/m}^3$$

Soit ;

$\rho.$  : Valeur de référence de la densité

$\Delta\rho$  : Ordre de grandeur de variation de densité

$V$  : Vitesse

Ce qui peut être traduit en variable et opérateur adimensionnels par :

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{1}{T} \frac{\partial}{\partial T} \quad \nabla = \frac{1}{L} \nabla' \quad \rho = \rho. + \Delta\rho \rho' \quad v = V v'$$

Avec  $\frac{\Delta\rho}{\rho.} \ll 1$  : Cette contrainte clé signifie que la variation de la densité est très faible par rapport à une valeur de référence de cette dernière.

En substituant ces variables sans dimension dans l'équation de continuité et en tenant compte de cette contrainte :

$$\frac{L}{VT} \frac{\Delta\rho}{\rho.} \frac{\partial \rho'}{\partial t'} + \frac{\Delta\rho}{\rho.} v'. \nabla' \rho' + \left(1 + \frac{\Delta\rho}{\rho.} \rho'\right) \nabla'. v' = 0 \quad (1)$$

Nous pouvons simplifier l'équation de continuité :

$$\nabla'. v' = 0 \text{ ce qui est équivalent à } \nabla. v = 0 \text{ ou } \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Correspondant à une divergence de vitesse nulle.

## 2.2.2 1<sup>re</sup> équation constitutive : concentration

### Définition de la concentration :

Revenons à notre parcelle de fluide d'un volume  $\Delta V$ . La masse totale d'un constituant dans ce volume sera donnée par :

$$m_i(t, x, \Delta V) = \rho \Delta V \Delta \int_{-\infty}^{\infty} c_i(t, x, \tau) d\tau, \text{ tel que } \Delta V \rightarrow 0 \quad (2)$$

La masse totale de la parcelle sera donc :

$$m(t, x, \Delta V) = \sum_i^I m_i(t, x, \Delta V), \text{ tel que } \Delta V \rightarrow 0 \quad (3)$$

Finalement, la variable sans dimension désignant la concentration d'un constituant dans une parcelle de fluide sera désignée par :

$$C_i(t, x) = \frac{m_i(t, x, \Delta V)}{m(t, x, \Delta V)} \quad (4)$$

De par sa définition, nous pouvons en déduire que la concentration d'un constituant sera comprise entre 0 et 1.

### Evolution de la fonction de distribution de la concentration :

Pour déterminer cette équation, il faut effectuer le bilan de masse d'une parcelle. Considérons un repère cartésien tel que le vecteur de position de tout point du domaine soit donné par  $X = (x, y, z)$  et  $\Delta\Omega$ , élément de volume à quatre dimensions : trois dimensions spatiales  $(x, y, z)$  et la dimension de l'âge désignée par la coordonnée  $\tau$ . Ce volume correspond à un élément de volume physique (voir figure 8) compris entre  $[x-\Delta x/2, x+\Delta x/2] \times [y-\Delta y/2, y+\Delta y/2] \times [z-\Delta z/2, z+\Delta z/2]$ , pour un intervalle d'âge de  $[\tau - \Delta\tau/2, \tau + \Delta\tau/2]$ , tel que  $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta\tau \rightarrow 0$

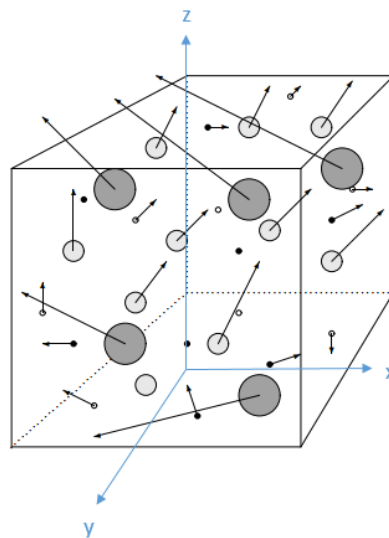


Figure 8 : Volume infinitésimal sur lequel on définit les variables macroscopiques du mélange

Le bilan de masse d'un constituant dans un tel volume, en tenant compte de la diffusion se déroulant à l'interface du volume et des phénomènes de production/destruction telles que des réactions chimiques ou encore la désintégration radioactive correspond à :

$$\begin{aligned}
 \rho \Delta x \Delta y \Delta z \Delta \tau \frac{\partial c_i(t, x, \tau)}{\partial t} &= \rho \Delta x \Delta y \Delta z \Delta \tau (p_i - d_i) && \text{: Masse produite – masse détruite} \\
 &- \rho \Delta y \Delta z \Delta \tau [q_{i,x}(t, x + \frac{\Delta x}{2}, y, z, \tau) \\
 &\quad - q_{i,x}(t, x - \frac{\Delta x}{2}, y, z, \tau)] && \text{: Flux sortant – flux rentrant selon x} \\
 &- \rho \Delta x \Delta z \Delta \tau [q_{i,y}(t, x, y + \frac{\Delta y}{2}, z, \tau) \\
 &\quad - q_{i,y}(t, x, y - \frac{\Delta y}{2}, z, \tau)] && \text{: Flux sortant – flux rentrant selon y} \\
 &- \rho \Delta x \Delta y \Delta \tau [-q_{i,z}(t, x, y, z + \frac{\Delta z}{2}, \tau) \\
 &\quad - q_{i,z}(t, x, y, z - \frac{\Delta z}{2}, \tau)] && \text{: Flux sortant – flux rentrant selon z} \\
 &- \rho \Delta x \Delta y \Delta z [-q_{i,\tau}(t, x, y, z, \tau + \frac{\Delta \tau}{2}) \\
 &\quad - q_{i,\tau}(t, x, y, z, \tau - \frac{\Delta \tau}{2})] && \text{: Flux sortant – flux rentrant selon } \tau
 \end{aligned}$$

Avec  $p_i$  et  $d_i$  étant respectivement les taux de production et de destruction.

La limite  $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \tau \rightarrow 0$ , correspondant à la définition du domaine, fournit l'équation gouvernant la variation de la concentration :

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = p_i - d_i - \nabla \cdot \mathbf{q}_i - \frac{\partial q_{i,\tau}}{\partial \tau} \quad (5)$$

Le flux  $\mathbf{q}_i$  représente le transport de matière dans le domaine spatial, ce flux étant indépendant de l'âge des particules transportées. Il représente d'une part l'advection due à la vitesse du fluide et d'autre part, la diffusion liée à la contribution des phénomènes de transports caractérisés par le modèle Fourier-Fick à l'aide du tenseur de diffusivité  $\mathbf{K}$  (voir figure 9).

$$\mathbf{q}_i = \mathbf{u}c_i - \mathbf{K} \cdot \nabla c_i \quad (6)$$

Ce dernier permet de prendre en compte un nombre important de phénomènes d'écoulements turbulents. La formulation de cette diffusivité dépendra de la nature de l'écoulement. Ce paramètre contextuel est dès lors difficile à quantifier mais nous pouvons supposer qu'il sera positif et symétrique. La suite de ce travail accordera une attention particulière à ce paramètre.

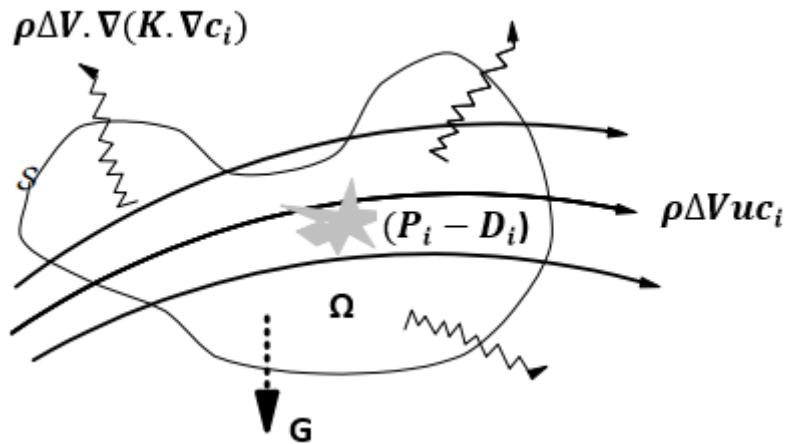


Figure 9 : Bilan de masse d'un constituant « i » sur un volume fixe  $\Omega$ . La variation de la masse est due aux sources internes ( $p_i - d_i$ ) et à l'export/import à travers la surface  $S$  dû à l'advection  $u$  du mélange, la migration due à la gravité du constituant par rapport au mélange et la diffusion.

Le terme  $q_{i,\tau}$  représente le terme de vieillissement ce qui correspond au fait qu'une particule aura une augmentation d'âge relative à l'augmentation de temps. Plus le temps progresse, plus l'âge de la particule augmentera proportionnellement jusqu'à sa sortie du domaine. Cela peut être vu comme une advection avec une vitesse unitaire dans la direction de l'âge ce qui implique que :

$$q_{i,\tau} = c_i$$

Nous trouvons finalement l'équation gouvernant l'évolution de la fonction de distribution de la concentration :

$$\boxed{\frac{\partial c_i}{\partial t} = p_i - d_i - \nabla \cdot q_i - \frac{\partial c_i}{\partial \tau}} \quad (7)$$

Cette dernière correspond à une des deux équations fondamentales sur lesquelles se base le calcul de l'âge des parcelles de fluides.

Equation finale de l'évolution de la concentration :

En intégrant l'équation (7) par rapport à l'âge avec comme conditions limites

$\lim_{\tau \rightarrow 0} c_i(t, x, \tau) = 0$  : Les particules ayant un âge de zéro ne font pas encore partie du domaine

$\lim_{\tau \rightarrow \infty} c_i(t, x, \tau) = 0$  : Aucune particule ne restera indéfiniment dans le domaine

L'équation donnant la concentration du « i<sup>e</sup> » constituant tout âge confondu sera :

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = P_i - D_i - \nabla \cdot (u C_i - K \cdot \nabla C_i) \quad (8)$$

Avec ;

$$P_i(t, x) = c_i(t, x, \tau = 0) + \int_0^{\infty} p_i(t, x, \tau) d\tau$$

$$D_i(t, x) = \int_0^{\infty} D_i(t, x, \tau) d\tau$$

### 2.2.3 2<sup>ème</sup> équation constitutive : la concentration d'âge

*Définition de l'âge moyen :*

La résolution de l'équation régissant la fonction de distribution de la concentration s'avère complexe puisqu'elle dépend de cinq variables indépendantes : les trois coordonnées spatiales, le temps et l'âge lui-même. S'il n'y a aucune information sur la distribution de l'âge, alors le calcul de la moyenne d'âge de chaque constituant peut être suffisant.

Cependant, il est nécessaire d'établir la relation entre la fonction de distribution de la concentration et l'âge moyen. L'équation gouvernant la distribution de concentration a été réalisée par rapport à un bilan de masse, qui est une quantité additive. Mais il n'y a aucun principe physique concernant l'âge pour pouvoir poursuivre cette même voie, raison pour laquelle une hypothèse supplémentaire doit être introduite. Cette dernière sera intitulée « l'hypothèse de l'âge moyen » en référence à « *Deleersnijder et al. (2001)* ».

*« The mean age of a set of particles is defined as the mass-weighted, arithmetic average of the ages of the particles considered; this is valid for particles of the same constituents or for particles of different constituents »*

Prenons comme exemple un système constitué uniquement de deux particules. Un tel système aura une moyenne d'âge  $\tau^{A+B}$  :

$$\tau^{A+B} = \frac{m^A \tau^A + m^B \tau^B}{m^A + m^B} \quad \text{Avec ;} \quad (9)$$

$m^x$  : Masse du constituant x

$\tau^x$  : Moyenne d'âge du constituant x

L'âge moyen est donc une variable intensive puisqu'il s'agit d'une valeur qui ne correspond pas directement à la quantité de matière dans le système considéré. Par exemple, si  $m^A$  et  $m^B$  étaient doublés, l'âge moyen ne varierait pas. Cependant, en vue d'émettre un lien entre la moyenne d'âge et la concentration, une valeur additive proportionnelle à la moyenne d'âge doit être fournie. C'est le cas pour « le contenu en âge » qui, toujours en suivant notre exemple, donnera :

$$(m^A + m^B) \tau^{A+B} = m^{A+B} \tau^{A+B} = m^A \tau^A + m^B \tau^B \quad (10)$$

Il en découle que l'âge moyen  $a_i(x, t)$  du  $i^e$  constituant au temps t et à la position correspond à la division de deux valeurs additives. Définissons la concentration de l'âge du  $i^e$  constituant,  $\alpha_i(t, x)$ , comme étant :

$$\alpha_i(t, x) = \int_0^\infty \tau c_i(t, x, \tau) d\tau \quad (11)$$

L'âge moyen correspond donc à

$$a_i(x, t) = \frac{\int_0^\infty \tau c_i(t, x, \tau) d\tau}{\int_0^\infty c_i(t, x, \tau) d\tau} = \frac{\alpha_i(t, x)}{c_i(t, x)} \quad (12)$$

A partir de l'équation (10), nous pouvons définir « le contenu de l'âge » totale du i<sup>e</sup> constituant :

$$A_i(t, x, \Delta V) = p \Delta V \alpha_i(t, x) \quad \text{Tel que } \Delta V \rightarrow 0 \quad (13)$$

Cette variable étant additive, nous pouvons affirmer que le « contenu d'âge » total d'une parcelle de fluide sera :

$$A(t, x, \Delta V) = \sum_{i=0}^I A_i(t, x, \Delta V) \quad \text{Tel que } \Delta V \rightarrow 0 \quad (14)$$

*Evolution de la concentration d'âge :*

En comparant les équations (13) - (14) et (2) - (3), il apparait que le rôle joué par la concentration de l'âge dans le calcul de « l'âge content » est similaire à celui de la concentration par rapport aux variations de la quantité de matière. Il n'est donc pas étonnant de retrouver une équation de flux aux dérivées partielles, similaire à celle gouvernant l'évolution de la concentration.

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} \tau c_i(t, x, \tau) = 0$$

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} \tau c_i(t, x, \tau) = 0$$

En tenant compte des conditions limites, nous pouvons trouver l'équation décrivant la variation de la concentration de l'âge en intégrant par rapport à «  $\tau$  » l'équation (8) après l'avoir multipliée au préalable par  $\tau$ .

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial t} = C_i + \pi_i - \delta_i - \nabla \cdot (u \alpha_i - K \cdot \nabla C \alpha_i) \quad (15)$$

Avec ;

$$\pi_i(t, x) = \int_0^\infty \tau p_i(t, x, \tau) d\tau$$

$$\delta_i(t, x) = \int_0^\infty \tau d_i(t, x, \tau) d\tau$$

Cette dernière équation représente la deuxième équation fondamentale en ce qui concerne le calcul de l'âge. Les deux équations fondamentales - (8) et (15) - fourniront l'âge moyen de la parcelle de fluide grâce à l'équation (12). A partir de cette section caractérisant les équations, nous simplifierons l'appellation d'âge moyen des parcelles de fluides par l'âge.

### 3. Exploitation de l'outil d'analyse, CART

#### 3.1 Description de la problématique

Afin d'appliquer la théorie de l'âge aux bassins rectangulaires, il est nécessaire de clarifier le contexte de la problématique. La situation est la suivante :

Un bassin rectangulaire dont le fluide est au repos, se voit attribuer un certain débit de remplissage. Une sortie permet l'évacuation de l'eau engendrant une faible variation de la hauteur d'eau. La trajectoire de l'écoulement provoqué par ces débits peut varier dans le temps et sera différente en fonction des configurations (voir figure 10). Ce dernier point sera détaillé par la suite. Plusieurs travaux ont été réalisés afin de modéliser ces écoulements de manière analytique ou encore numérique. Dans ceux-ci, Dufresne et al. (2010,2012) ainsi que Peltier et al. (2013) ont démontré l'importance d'optimiser les réservoirs (en terme de transport de sédiment et d'emmagasinement d'eau).

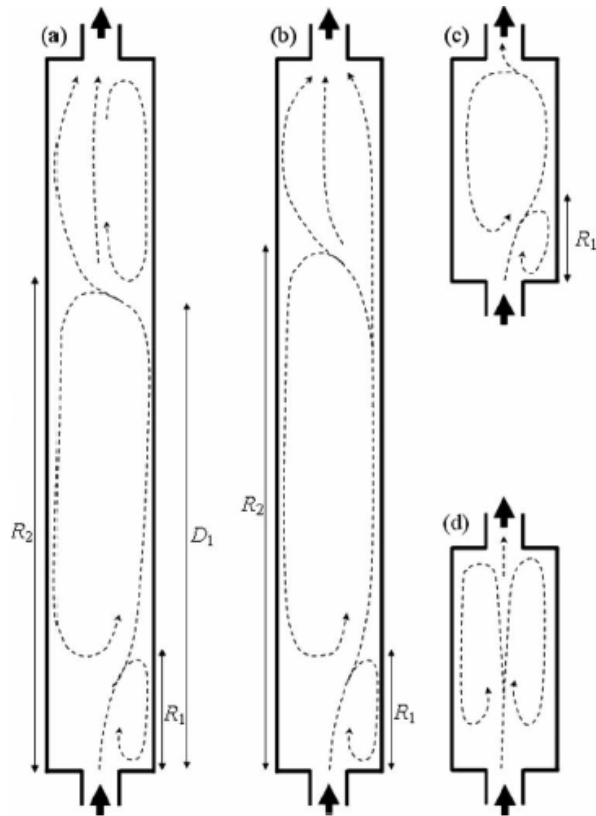


Figure 10 : Illustrations des différentes circulations

Cette optimisation ne peut se faire sans comprendre les champs d'écoulement s'y développant. Ils ont ainsi réussi à classer les écoulements en 4 types de patterns distincts. En fonction de paramètres décrits dans la suite de cette étude, leur véracité a été confirmée par différents rapports mettant en avant la précision de ces modèles.

Nous pouvons par exemple citer la prédiction de l'énergie cinétique à travers les différents bassins par le modèle  $k - \epsilon$  en comparaison avec des mesures expérimentales à l'aide de 8 UVP placés dans les bassins permettant ainsi de mesurer les composantes de vitesse dans deux directions x et y (voir figure 11).

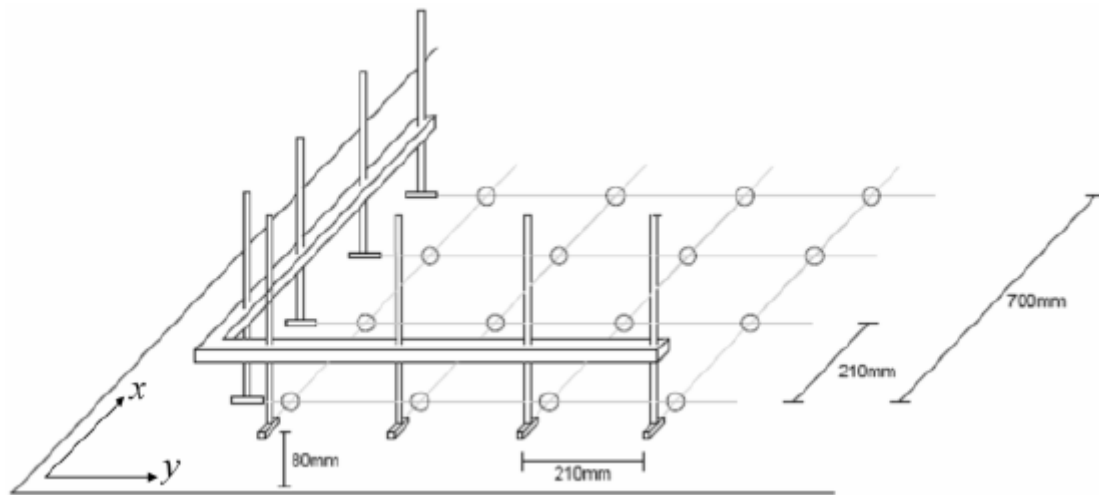


Figure 11 : Système de 8 UVP installé dans les réservoirs afin de mesurer les composantes de vitesse.

Nous pouvons constater sur la figure 12 que le modèle  $k - \epsilon$  fournit des résultats relativement proches de la réalité :

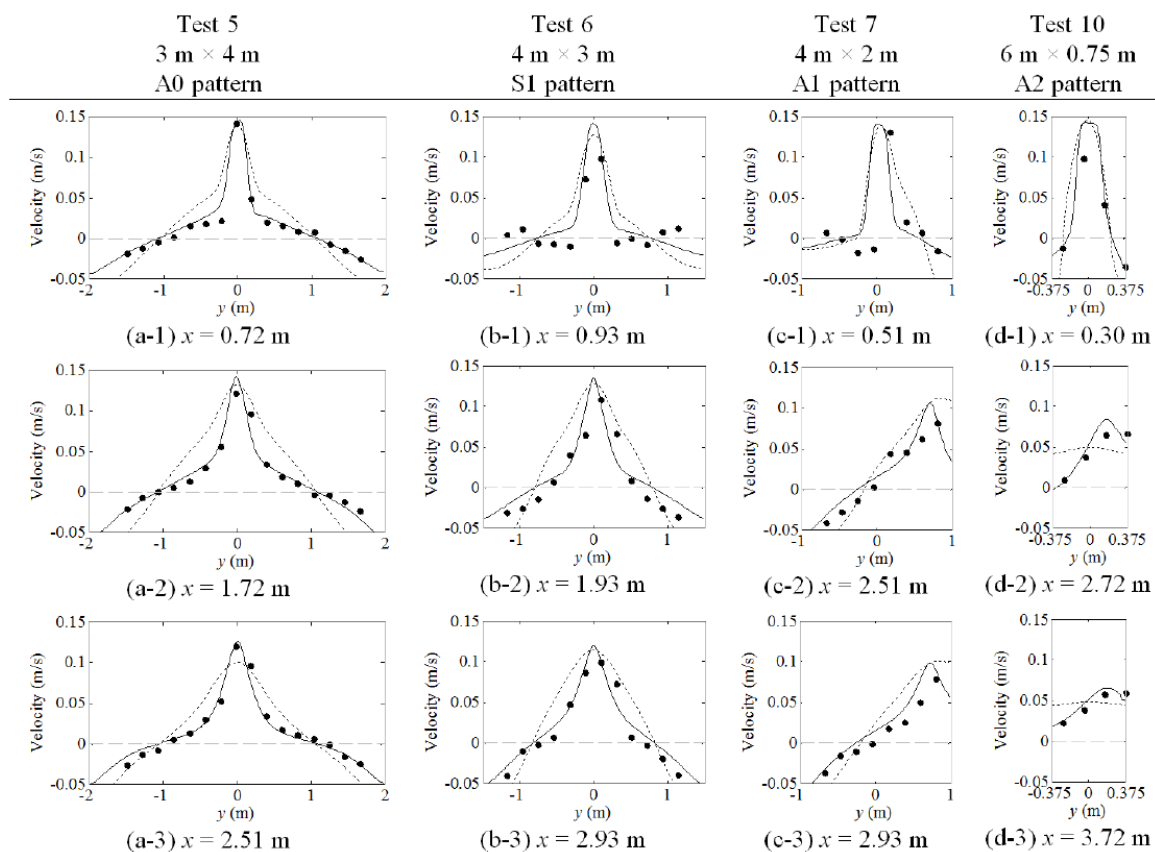


Figure 12 : Observation et calcul du profil de vitesse dans une coupe transversale pour 4 géométries différentes : de manière expérimentale (\*), numérique avec un modèle  $k - \epsilon$  (—) et avec un modèle algébrique turbulent (- - -).

La présente étude tente de comprendre ces écoulements de manière différente, via le logiciel WOLF généré par l'Université de Liège. Ce dernier, basé sur le modèle  $k - \epsilon$ , couramment employé pour modéliser une fermeture turbulente, nous permettra d'effectuer différentes simulations.

Les paragraphes précédents visent à exprimer le contexte dans lequel vient s'ajouter cette étude ainsi que les résultats déjà confirmés par différentes études antérieures. Une partie importante de ces dernières est bien entendu référencée en fin de rapport et constitue la base de ce dernier. Des explications plus pointues seront apportées au fur et à mesure de l'avancement de ce rapport.

## 3.2 Equations analytiques à travers le domaine étudié

### 3.2.1 Interprétation du phénomène

L'utilisation de la théorie de l'eau renouvelée semble être une direction logique à suivre. Ce processus consiste à remplacer progressivement l'eau initialement contenue dans le réservoir par l'eau de renouvellement injectée à l'entrée. En vue de quantifier le taux de renouvellement, nous aurons recours à l'approche générique suggérée par Courgue et al. (2007) et appliquée avec réussite par de Brye et al. (2012) ou Kärnä and Baptista (2016).

Celle-ci propose la séparation du fluide en différents types. Dans la situation qui nous occupe, l'eau de renouvellement fera office de traceur par lequel nous pourrions visualiser l'évolution de l'âge des « jeunes » particules s'infiltrant dans le bassin. L'eau initiale sera le deuxième type d'eau, une théorie appropriée pour estimer le temps écoulé pour l'évacuation de cette eau originelle. Celle-ci serait la théorie de temps de résidence indiquant le temps que met une parcelle d'eau se trouvant initialement dans le bassin pour être évacuée de celui-ci. Notons que ce calcul de temps de résidence ne fait pas l'objet de cette étude mais il est évident qu'elle pourrait, dans le futur, être un complément à cette dernière.

En fonction des hypothèses décrites précédemment, nous pouvons imposer les conditions suivantes afin de pouvoir résoudre ces équations partielles décrivant la variation de l'âge des particules au cours du temps.

Les indices suivants identifient le type d'eau :

w : water      o : eau originelle/initiale      r : eau de renouvellement

$C_w(t, x) = C_o(t, x) + C_r(t, x) = 1$  : Relation entre la concentration de l'eau totale, l'eau de renouvellement et l'eau originelle.

$0 \leq C_o(t, x) \leq 1$  : définition d'une concentration, voir équation (4)

$0 \leq C_r(t, x) \leq 1$  : définition d'une concentration, voir équation (4)

$C_o(0, x) = 1$  : situation initiale, voir figure 13

$C_r(0, x) = 0$  : situation initiale, voir figure 13

$\lim_{t \rightarrow \infty} C_o(t, x) = 0$  : situation finale, voir figure 14

$\lim_{t \rightarrow \infty} C_r(t, x) = 1$  : situation finale, voir figure 14

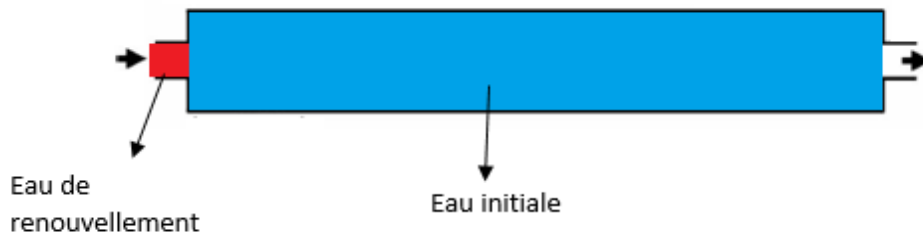


Figure 13 : représentation de la situation initiale dans le bassin

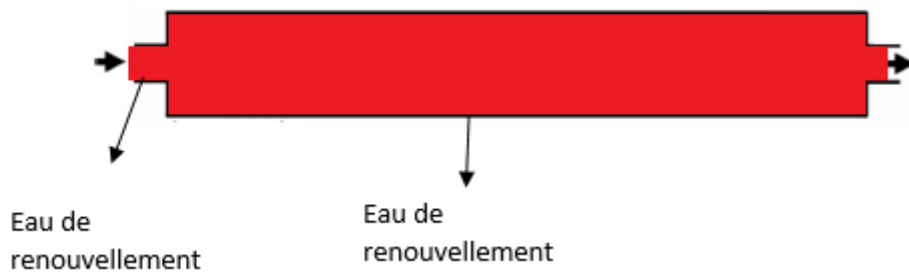


Figure 14 : représentation de la situation finale dans le bassin

C'est cette eau de renouvellement qui a été choisie comme traceur passif afin de caractériser l'écoulement selon CART. Bien que conscients que la parcelle de fluide est constituée d'autres éléments que d'eau « pure » et que cette étude s'avère être un premier pas vers une interprétation future plus précise, nous considérons que le bassin et plus précisément qu'une parcelle de fluide est composée uniquement d'eau pure.

Les équations (8) et (15) se simplifient donc respectivement et

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -\nabla \cdot (u C_i - K \cdot \nabla C_i) \quad (8')$$

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial t} = C_i - \nabla \cdot (u \alpha_i - K \cdot \nabla C \alpha_i) \quad (15')$$

Comme il a été mentionné auparavant, les phénomènes d'interactions entre les constituants sont un élément non négligeable. L'étude de ces phénomènes s'avérant complexe, nous faisons l'hypothèse qu'ils peuvent être négligés en considérant uniquement de l'eau pure à l'intérieur du domaine étudié.

### 3.2.2 Construction de conditions aux limites compatibles

Dans l'optique de modéliser de manière analytique et numérique les phénomènes se déroulant dans les bassins, il est impératif de faire la séparation entre le domaine étudié et son environnement extérieur en imposant des conditions à l'interface de ceux-ci tel que cela a été présenté à la figure 15.

**Domaine d'intérêt :  $\Omega$**

**Limite du domaine :  $\Gamma = \Gamma^i \cup \Gamma^e \cup \Gamma^l$**

**Vecteur unitaire sortant du domaine :  $\vec{n}$**

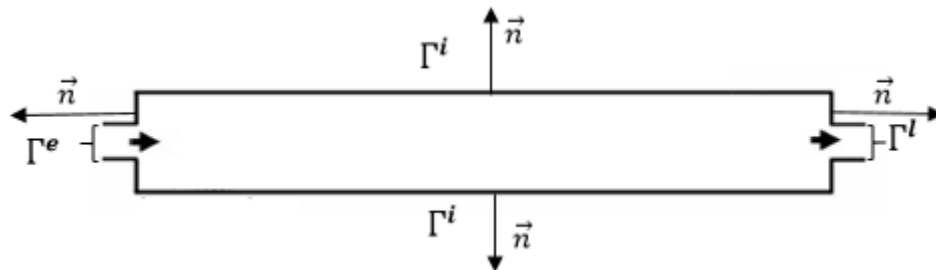


Figure 15 : Schéma représentant les limites du domaine d'application

$\vec{v}$  : vitesse horizontale à la profondeur moyenne

Limites imperméables :  $\Gamma^i : \vec{v} \cdot \vec{n} = 0$  : **Les parcelles de fluides ne peuvent franchir une limite imperméable.**

Limites à l'entrée :  $\Gamma^e : \vec{v} \cdot \vec{n} < 0$  : **On considère que les parcelles de fluides à l'entrée du bassin peuvent uniquement entrer dans ce dernier et non en sortir.**

Limites à la sortie :  $\Gamma^l : \vec{v} \cdot \vec{n} > 0$  : **On considère que les parcelles de fluides à la sortie du bassin peuvent uniquement sortir et en aucun cas revenir dans celui-ci.**

Régime stationnaire :

$\frac{\partial}{\partial t} = 0$  : **Le pattern de l'écoulement est considéré comme fixé**

La réflexion suivante tend à indiquer d'une part les conditions implémentées en WOLF et d'une autre à démontrer la compatibilité de ces dernières.

Dans un premier temps, il est nécessaire de souligner la dépendance des paramètres utilisés pour obtenir la moyenne d'âge. Pour ce faire, la description de l'outil d'analyse CART a révélé l'utilisation de deux variables : la concentration  $C(t,x)$  et la concentration d'âge  $\alpha(t,x)$ .

En guise de rappel par rapport à ce qui a été vu précédemment, celles-ci ne sont pas des variables primitives. En effet, elles découlent de la fonction de distribution de l'âge  $c(t,x,\tau)$ . Par souci de clarté, nous mentionnons une nouvelle fois les définitions suivantes :

$$C(t, x) = \int_0^{\infty} c(t, x, \tau) d\tau \quad (16)$$

Et

$$\alpha(t, x) = \int_0^{\infty} \tau c(t, x, \tau) d\tau \quad (17)$$

Selon l'*age averaging hypothesis* (Deleersnijder et al. 2001), l'âge moyen vaut :

$$a(x, t) = \frac{\alpha(t, x)}{C(t, x)} = \frac{\int_0^{\infty} \tau c(t, x, \tau) d\tau}{\int_0^{\infty} c(t, x, \tau) d\tau} \quad (18)$$

Même si l'on se contente de l'âge moyen (et que l'on ne calcule donc pas explicitement la fonction de distribution), il est souhaitable d'écrire d'abord les conditions aux limites que l'on imposerait pour résoudre l'équation pour la fonction de distribution et, dans un second temps, de transposer ces conditions aux deux variables de base.

Le calcul de l'âge porte dans cette étude sur la partie stationnaire de l'écoulement, à savoir la situation où l'eau originelle a été totalement évacuée du bassin et où seule règne l'eau de renouvellement provenant de l'entrée (voir figure 14). Cette hypothèse étant posée, l'indice « r » symbolisant l'eau de renouvellement sera abandonné à partir de ce point.

- Conditions à l'entrée :

Toutes les parcelles de fluide sur  $\Gamma^e$  ont un âge nul.

La condition sur la fonction de distribution peut alors s'écrire via la fonction de Dirac :

$$c(x, \tau) = \delta(\tau - 0) \quad (19)$$

Il en découle alors les conditions sur les variables suivantes, (voir équations 16 et 17) :

$$C(x, \tau) = \int_0^{\infty} c(x, \tau) d\tau = \int_0^{\infty} \delta(\tau - 0) d\tau = 1 \quad (20)$$

$$\text{Et} \quad \alpha(x, \tau) = \int_0^{\infty} \tau c(x, \tau) d\tau = \int_0^{\infty} \tau \delta(\tau - 0) d\tau = 0 \quad (21)$$

De par l'équation 18, l'âge moyen vaudra sur cette frontière :

$$\Leftrightarrow a(x, t) = \frac{\alpha(t, x)}{c(t, x)} = 0 \quad (22)$$

- Conditions à la sortie :

Condition de radiation simple de type « gradient nul » sur  $\Gamma^l$ . Cette condition semble être la plus intuitive à imposer à une sortie. La condition de rayonnement de Sommerfeld s'énonce comme suit : « *les sources doivent être des sources, pas des puits d'énergie. L'énergie rayonnée des sources doit se disperser à l'infini ; aucune énergie ne peut être rayonnée de l'infini vers le domaine étudié.* ». La correspondance à notre problématique est donc d'imposer que le terme diffusif soit nul à la sortie. Par ce fait, seul le terme convectif sera non nul, indiquant ainsi qu'une parcelle de fluide sortante ne peut revenir dans le domaine.

Ce qui se traduit mathématiquement par la condition pour la fonction de concentration suivante :

$$[K \nabla c \cdot \vec{n}]_{x \in \Gamma^l} = 0 \quad (23)$$

Il s'ensuit que l'intégrale de l'équation (23) donne :

$$0 = \int_0^\infty K \nabla c \cdot \vec{n} d\tau = K \nabla \underbrace{\int_0^\infty c d\tau}_{C(x, \tau)} \cdot n = [K \nabla C \cdot \vec{n}]_{x \in \Gamma^l} \quad (24)$$

La retranscription sur la concentration fournit alors un gradient normal nul de concentration comme indiqué par la formule (24).

De la même manière :

$$0 = \int_0^\infty \tau K \nabla c \cdot \vec{n} d\tau = K \nabla \underbrace{\int_0^\infty \tau c d\tau}_{\alpha(x, \tau)} \cdot n = [K \nabla \alpha \cdot \vec{n}]_{x \in \Gamma^l} \quad (25)$$

Indiquant un gradient normal nul de concentration d'âge telle que la concentration  $C(\mathbf{x}, \tau) = 1$  dans l'ensemble du domaine (écoulement stationnaire), on obtient finalement un gradient normal d'âge nul.

$$[K\nabla a \cdot \vec{n}]_{x \in \Gamma^i} = 0 \quad (26)$$

- Conditions sur les frontières imperméables :

Il n'y a pas de flux au travers des frontières imperméables  $\Gamma^i$ .

Cette condition se traduit par :

$$[(c\vec{v} - K\nabla c) \cdot \vec{n}]_{x \in \Gamma^i} = 0 \quad (27)$$

L'intégrale nous permet de déduire la condition sur la concentration :

$$\left[ \underbrace{\left( \int_0^\infty c d\tau \right)}_{C(\mathbf{x}, \tau)} \cdot \vec{v} - K \nabla \underbrace{\left( \int_0^\infty c d\tau \right)}_{C(\mathbf{x}, \tau)} \right]_{x \in \Gamma^i} \cdot \vec{n} = [(C\vec{v} - K\nabla C) \cdot \vec{n}]_{x \in \Gamma^i} = 0 \quad (28)$$

Correspondant ainsi à une concentration : flux nul.

De la même manière :

$$\left[ \underbrace{\left( \int_0^\infty \tau c d\tau \right)}_{\alpha(\mathbf{x}, \tau)} \cdot \vec{v} - K \nabla \underbrace{\left( \int_0^\infty \tau c d\tau \right)}_{\alpha(\mathbf{x}, \tau)} \right]_{x \in \Gamma^i} \cdot \vec{n} = [(\alpha\vec{v} - K\nabla \alpha) \cdot \vec{n}]_{x \in \Gamma^i} = 0 \quad (29)$$

Comme  $C = 1$  partout, alors on a pour l'âge moyen un flux d'âge nul décrit par l'équation (30) :

$$[(\alpha\vec{v} - K\nabla \alpha) \cdot \vec{n}]_{x \in \Gamma^i} = 0 \quad (30)$$

Avec la condition imposée sur la frontière imperméable, cela donne une condition de gradient nul :

$$[\nabla \alpha]_{x \in \Gamma^i} = 0 \quad (31)$$

## 4 Modélisation numérique

Afin de résoudre ces équations différentielles, l'utilisation d'un logiciel s'avère nécessaire, raison pour laquelle nous avons choisi pour la résolution numérique le logiciel Wolf développé par l'Université de Liège.

Une attention particulière a été portée sur l'implémentation des conditions limites adéquates en accord avec le modèle mathématique, voir section 3.2.2.

Par ailleurs, le tenseur de diffusion discuté précédemment via l'équation (6), peut prendre des valeurs très variées. La bonne estimation de ce terme de diffusion est par conséquent une part essentielle de la modélisation numérique.

### 4.1 Logiciel WOLF : modèle $k - \epsilon$

Les simulations en « Wolf » sont basées sur un modèle à viscosité turbulente (Modèle du premier ordre) qui consiste à modéliser directement les tensions de Reynolds à l'aide d'une viscosité turbulente.

Cela est rendu possible en tenant compte de l'hypothèse de Boussinesq ci-après. Par similitude avec la loi de comportement d'un fluide visqueux reliant le tenseur des contraintes visqueuses au champ de vitesse, Boussinesq a proposé de relier le tenseur de Reynolds au champ moyen de vitesse par :

$$R_{ij} = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (32)$$

Où  $\mu_t(X, t)$  représente une viscosité turbulente. L'objet de la modélisation de la turbulence dans ce cadre est d'avoir une relation avec ce paramètre et les inconnues, afin de fermer le système d'équations à résoudre.

Cette relation est fournie par la formule suivante :

$$R_{ij} = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (33)$$

Où  $\mu_t$  est ici un scalaire.

En procédant par analyse dimensionnelle, Prandtl et Kolomgorov ont dérivé la relation suivante pour la viscosité turbulente :

$$\mu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (34)$$

où  $C_\mu$  : est une constante à déterminer

$k$  : Energie cinétique

$\epsilon$  : Taux de dissipation

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon}$$

Ce modèle repose alors sur deux équations :

1) Equation de  $k$  :

L'équation de transport de l'énergie turbulente s'écrit :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_k \frac{\partial k}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \left( \nu + \frac{C_\mu k^2}{\sigma_k \epsilon} \right) \frac{\partial k}{\partial x_k} \right] + \frac{C_\mu k^2}{\epsilon} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_k} + \frac{\partial U_k}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_k} - \epsilon \quad (35)$$

2) L'équation de la dissipation

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U_k \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \left( \nu + \frac{C_\mu k^2}{\sigma_\epsilon \epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} \right] + C_{\epsilon 1} C_\mu k \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_k} + \frac{\partial U_k}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_k} - \frac{C_{\epsilon 2} \epsilon^2}{k} \quad (36)$$

Avec  $\sigma_\epsilon$ ,  $C_\mu$ ,  $C_{\epsilon 1}$ ,  $C_{\epsilon 2}$  ; qui sont des constantes à déterminer.

#### 4.2 Résolution de l'équation de la moyenne d'âge

A partir de ce modèle numérique, nous avons pu estimer l'âge des parcelles de fluides selon différentes configurations, sous différentes hypothèses déjà exprimées précédemment et présentées ci-dessous.

1<sup>re</sup> hypothèse : L'écoulement est stationnaire

Effectivement, la quasi-totalité des écoulements dans les différentes configurations tend vers une allure constante après un certain laps de temps qui correspond a priori au temps de résidence maximale permettant à l'eau de renouvellement de couvrir l'entièreté du bassin.

2<sup>e</sup> hypothèse : Régime stationnaire du point de vue de l'âge

Cela signifie que l'eau originelle a été totalement évacuée du bassin. Nous sommes donc dans la situation finale présentée précédemment :

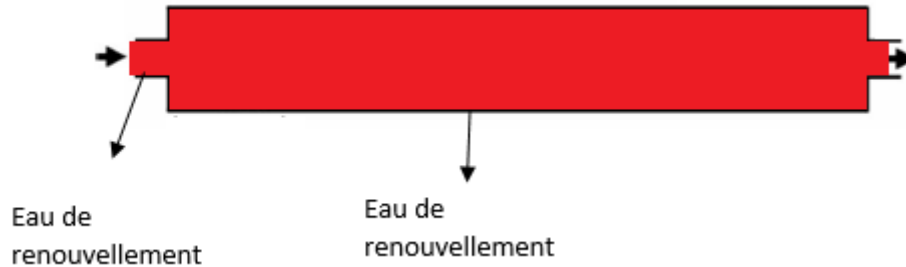


Figure 16 : Représentation schématique de la situation utilisée pour le calcul numérique

Conditions s'étendant à l'ensemble du bassin :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} C_0(t, x) = 0$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} C_r(t, x) = 1$$

En tenant compte des hypothèses sur la situation stationnaire, les équations constitutives du chapitre 2 peuvent être simplifiées de la manière suivante :

- L'équation décrivant la concentration de l'eau de renouvellement devient (voir équation **(8')**) :

$$\frac{\partial(HC_{\vec{x}})}{\partial t} = -\nabla \cdot (HC_{\vec{x}}\vec{v} - HK\nabla C_{\vec{x}}) \text{ ce qui correspond à l'intégration sur la hauteur de l'équation (37) de continuité, la concentration du traceur passif étant égale à 1 dans tout le bassin.}$$

- L'équation décrivant la concentration de l'âge de l'eau **(16')** dans une situation stationnaire, avec :  $\alpha_r(t, x) = a_r(t, x) * C_r(t, x)$ , devient :

$$\frac{\partial(Ha_r C_r)}{\partial t} = HC_{\vec{x}} - \nabla \cdot (Ha_r C_r \vec{v} - HK\nabla a_r C_r) \longrightarrow \nabla \cdot (Ha_r \vec{v}) = H + \nabla \cdot (HK\nabla a_r) \quad (38)$$

Puisque nous sommes en régime stationnaire, l'âge à un endroit ne variera plus.

$$\nabla \cdot (Ha_r \vec{v}) = H + \nabla \cdot (HK\nabla a_r) \quad (39)$$

C'est cette dernière équation **(39)** que le logiciel Wolf résoudra pour fournir l'âge des parcelles de fluide en fonction de leur position après un certain laps de temps pour atteindre le régime stationnaire.

L'étude a ensuite été décomposée en différentes séquences. Les résultats finaux regroupant l'ensemble des séquences, nous n'avons pas jugé nécessaire de commenter « excessivement » chacune d'entre elles. Il s'avère toutefois important de les décrire brièvement afin de suivre le « fil rouge » de la réflexion :

1<sup>re</sup> étape : Résolution de l'équation **(39)** sans tenir compte de la diffusion

2<sup>e</sup> étape : Résolution de l'équation **(39)** avec un tenseur de diffusion constant

3<sup>e</sup> - 4<sup>e</sup> étape : Résolution de l'équation **(39)** avec un tenseur de diffusion variable et étude de sensibilité de l'âge en fonction de celui-ci.

5<sup>e</sup> étape : Observation et comparaison de l'âge par rapport à la géométrie des bassins.

## 4.3 Résultats des simulations numériques

### 4.3.1 Calcul de l'âge sans tenir compte de la diffusion

Afin de nous familiariser avec les résultats obtenus et de tester le logiciel Wolf, l'étude a d'abord été effectuée sans tenir compte du phénomène de diffusion. C'est ainsi que nous avons pu observer le pattern de l'âge dans les différentes configurations. Dans un premier temps, certaines d'entre elles ne donnaient cependant aucun résultat en raison de « légères failles dans le code informatique ». Après avoir prévenu l'Université de Liège par l'intermédiaire de Messieurs Dewals et Archambeau, pour que soient corrigés immédiatement ces « bugs » en vue de permettre l'étude de l'entièreté des configurations, chacun des patterns d'âge a été observé en fonction des configurations. Ci-après, un exemple pour la configuration L600-B400, c'est-à-dire pour un bassin de 6 m de longueur et de 4 m de large.

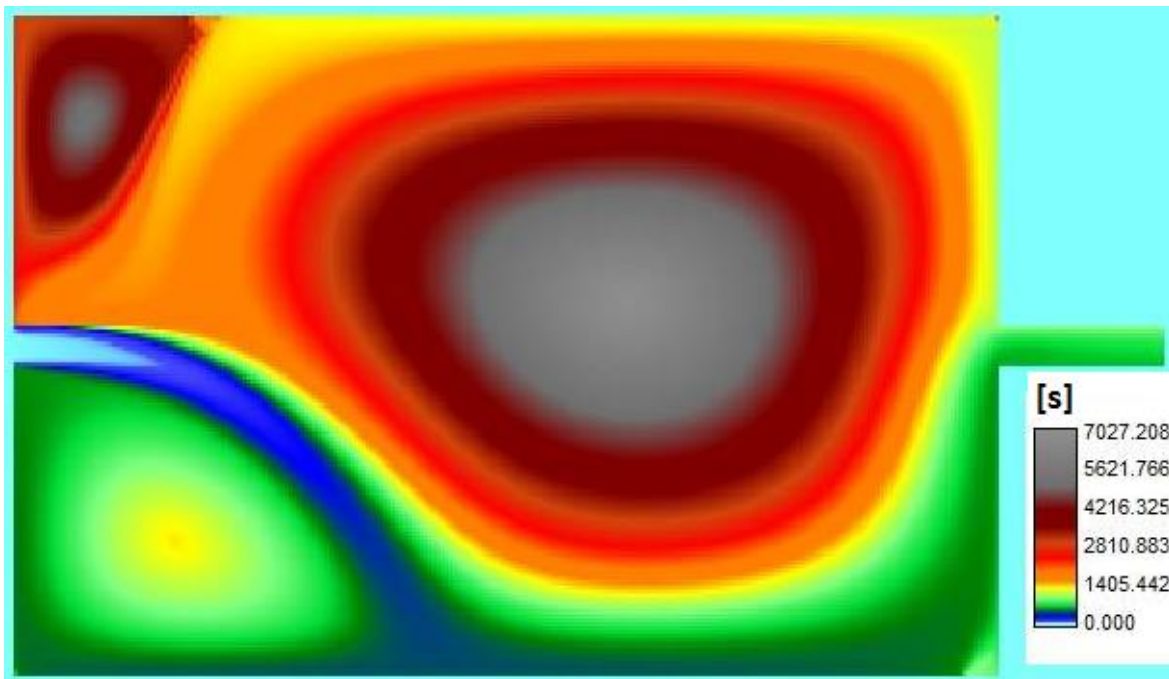


Figure 17 : pattern de la distribution d'âge dans le bassin L600-B400

Les données récoltées, dont un résumé est repris dans la figure 17, montrent la répartition de l'âge lors d'un écoulement à l'état stationnaire à un instant « t » (sans diffusion). Bien que pouvant sembler évident, cette « photographie » montre l'influence des recirculations sur le temps écoulé depuis que la parcelle de fluide est entrée dans le bassin. La comparaison avec le pattern de l'âge et les trajectoires de l'écoulement se fera dans la suite de cette étude.

#### 4.3.2 Calcul de l'âge avec un tenseur de diffusion constant

Comme mentionné précédemment, nous étions conscients que le phénomène de diffusion devait être pris en compte pour obtenir des résultats fiables. Nous avons alors incorporé une matrice de diffusion constante dans le calcul de l'âge. Comme nous l'avions prédit, la répercussion sur l'âge était au rendez-vous. Toujours sur base de la même configuration de bassin, voici les patterns d'âge respectivement obtenus pour une diffusion constante spatialement de 0.01 – 0.001 - 0.001 - 0.0001 [m<sup>2</sup>/s].

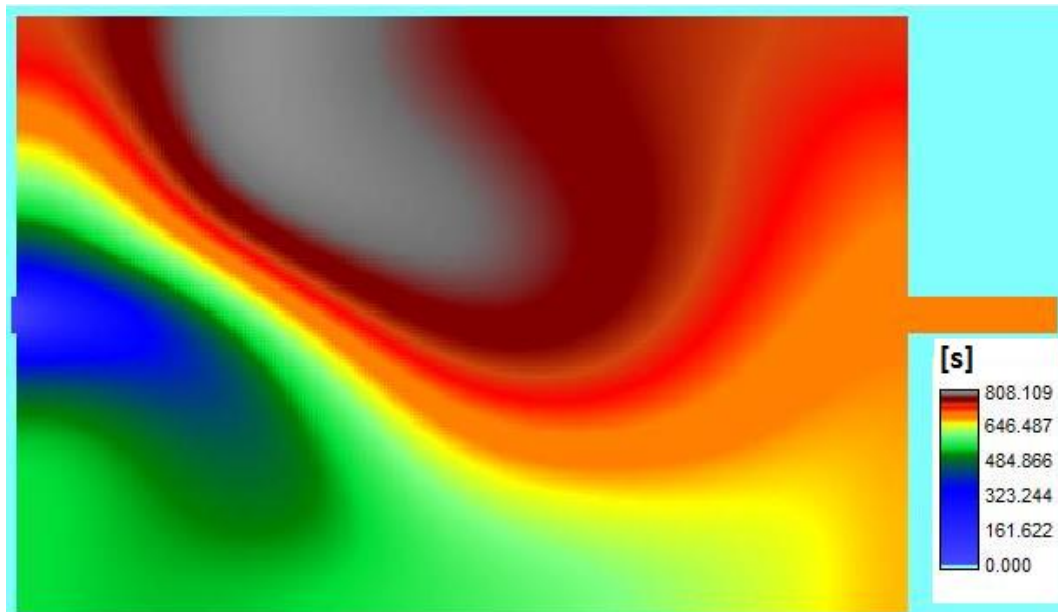


Figure 18 : pattern de la distribution d'âge dans le bassin L600-B400 pour  $k = 0.01 \text{ m}^2/\text{s}$

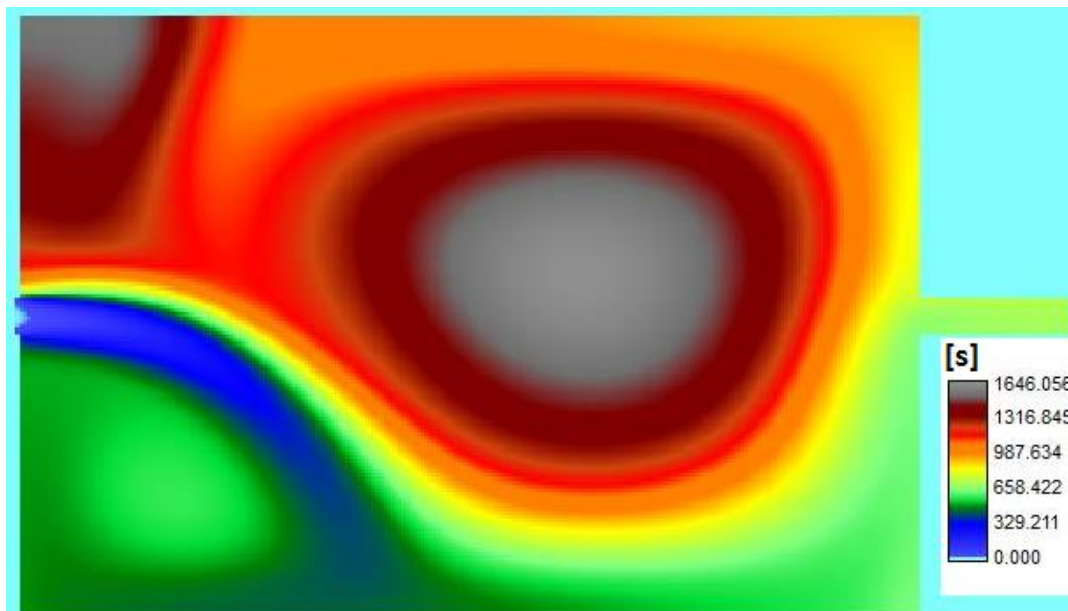


Figure 19 : pattern de la distribution d'âge dans le bassin L600-B400 pour  $k = 0.001 \text{ m}^2/\text{s}$

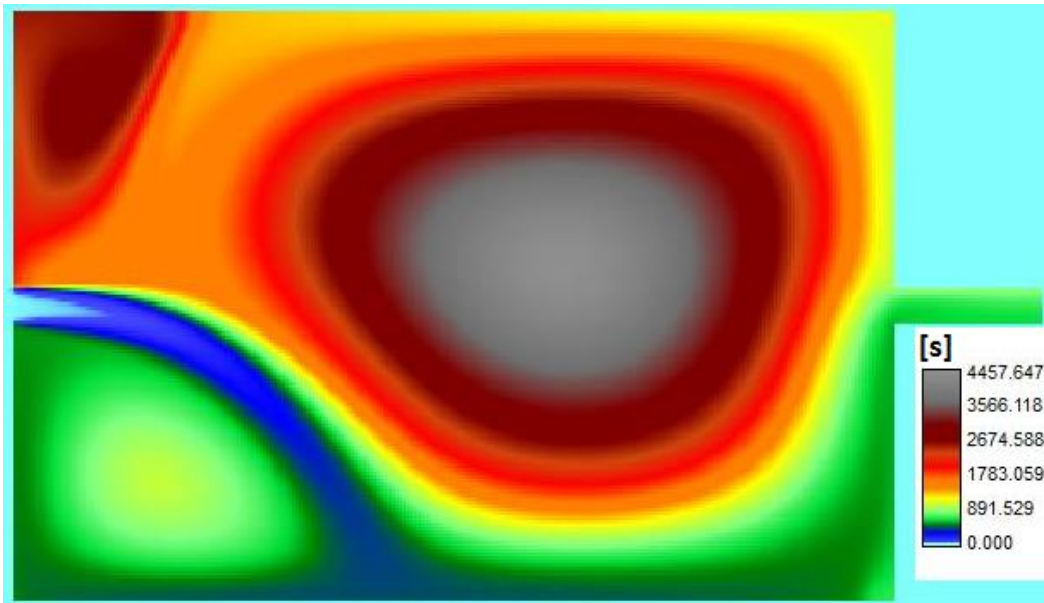


Figure 20 : pattern de la distribution d'âge dans le bassin L600-B400 pour  $k = 0.0001 \text{ m}^2/\text{s}$

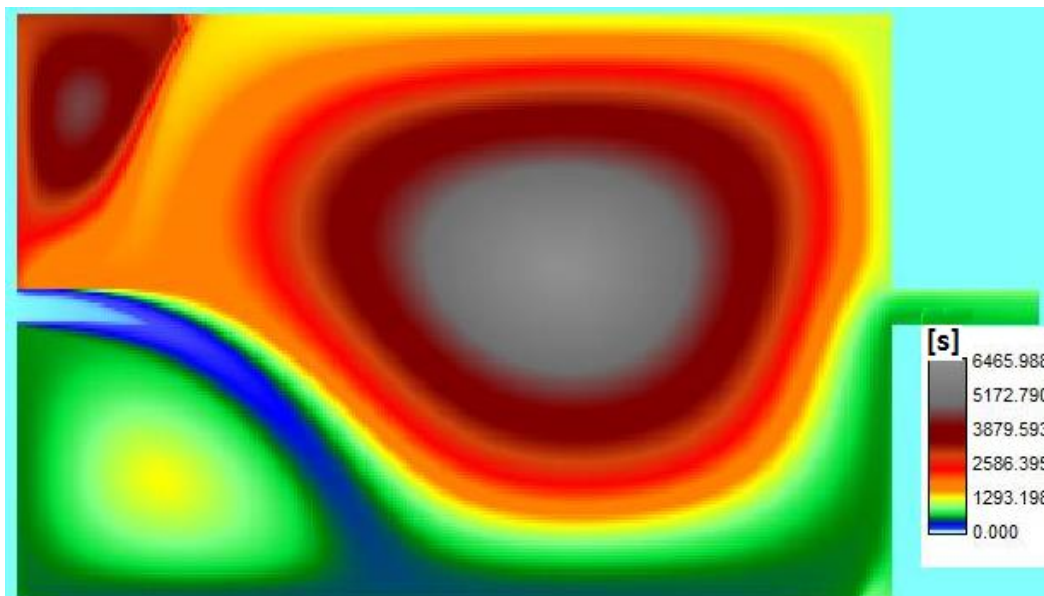


Figure 21 : pattern de la distribution d'âge dans le bassin L600-B400 pour  $k = 0.00001 \text{ m}^2/\text{s}$

Nous constatons, à travers les figures de 18-19-20-21, que le pattern de l'âge diminue avec l'augmentation de la diffusion. L'augmentation de diffusion tend à homogénéiser la matière, il n'est donc pas anormal de trouver un pattern d'âge plus homogène. La répartition de distribution de l'âge sera évoquée davantage dans la suite du travail.

#### 4.3.3 Calcul de l'âge avec un tenseur de diffusion variable spatialement

Après confirmation de l'impact de la diffusion sur l'âge, il s'est avéré nécessaire d'approximer au mieux celle-ci par rapport à la réalité. Pour ce faire, nous avons eu recours à la matrice de viscosité cinématique comme matrice de diffusion de référence. Ces deux paramètres étant du même ordre de grandeur, il était justifié de considérer la matrice de viscosité cinématique déjà implémentée dans WOLF comme point de départ pour la matrice de diffusion. L'étude apporte alors un test de sensibilité sur ce paramètre influençant la donnée étudiée.

Pour ce faire, nous avons appliqué un coefficient multiplicateur - alpha - à la matrice de diffusion variable spatialement. Afin de faciliter la visualisation du phénomène, nous avons choisi de représenter l'âge de manière adimensionnelle. En divisant l'âge réel par « l'âge advectif », le temps estimé pour qu'une parcelle de fluide parcourt en ligne droite le bassin en fonction de sa vitesse d'entrée.

$$\hat{age}_{advectif} = \frac{L}{U} \quad \text{Avec ;} \quad (40)$$

$$\hat{age}_{adimensionnel} = \frac{\hat{age}_{réel}}{\hat{age}_{advectif}} \quad \begin{array}{l} L : \text{longueur du bassin} \\ U : \text{Vitesse moyenne à l'entrée} \\ \text{selon } \vec{X} \end{array} \quad (41)$$

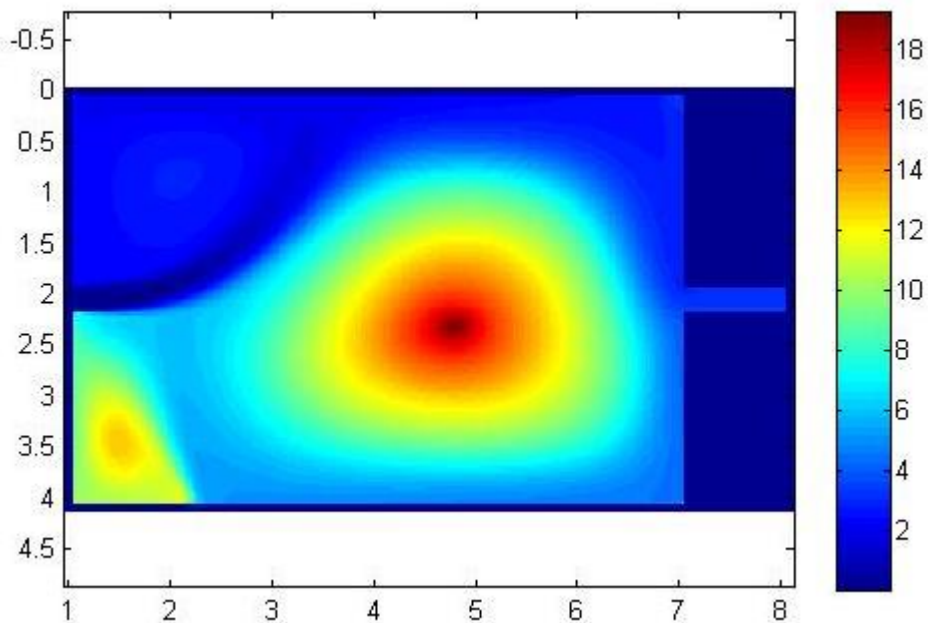


Figure 22 : pattern de la distribution de l'âge adimensionnel dans le bassin L600-B400 pour  $k = \text{variable}$

La figure 22 représente donc le pattern de l'âge advectif pour un coefficient de diffusion variable spatialement correspondant au coefficient de viscosité cinématique. L'âge advectif pour cette géométrie de bassin est de 214 s, ce qui donne un âge réel maximal d'environ  $18 * 214 = 3\ 852$  secondes. Cette valeur est proche de l'âge maximal réel observé à la figure 16 pour un coefficient de diffusion constant de  $0.0001\ m^2/s$ . Bien que la comparaison ne puisse s'arrêter à la simple interprétation des valeurs maximales, il est toutefois à noter que le résultat obtenu est cohérent par rapport aux précédents puisque l'ordre de grandeur de la viscosité cinématique oscille aux alentours de  $10^{-4}\ m^2/s$ , valeur alors fixée pour le coefficient de diffusion (voir figure 20).

Afin de pouvoir comparer l'ensemble des résultats, la présente étude indique la répartition de l'âge adimensionnel sous forme d'histogramme.

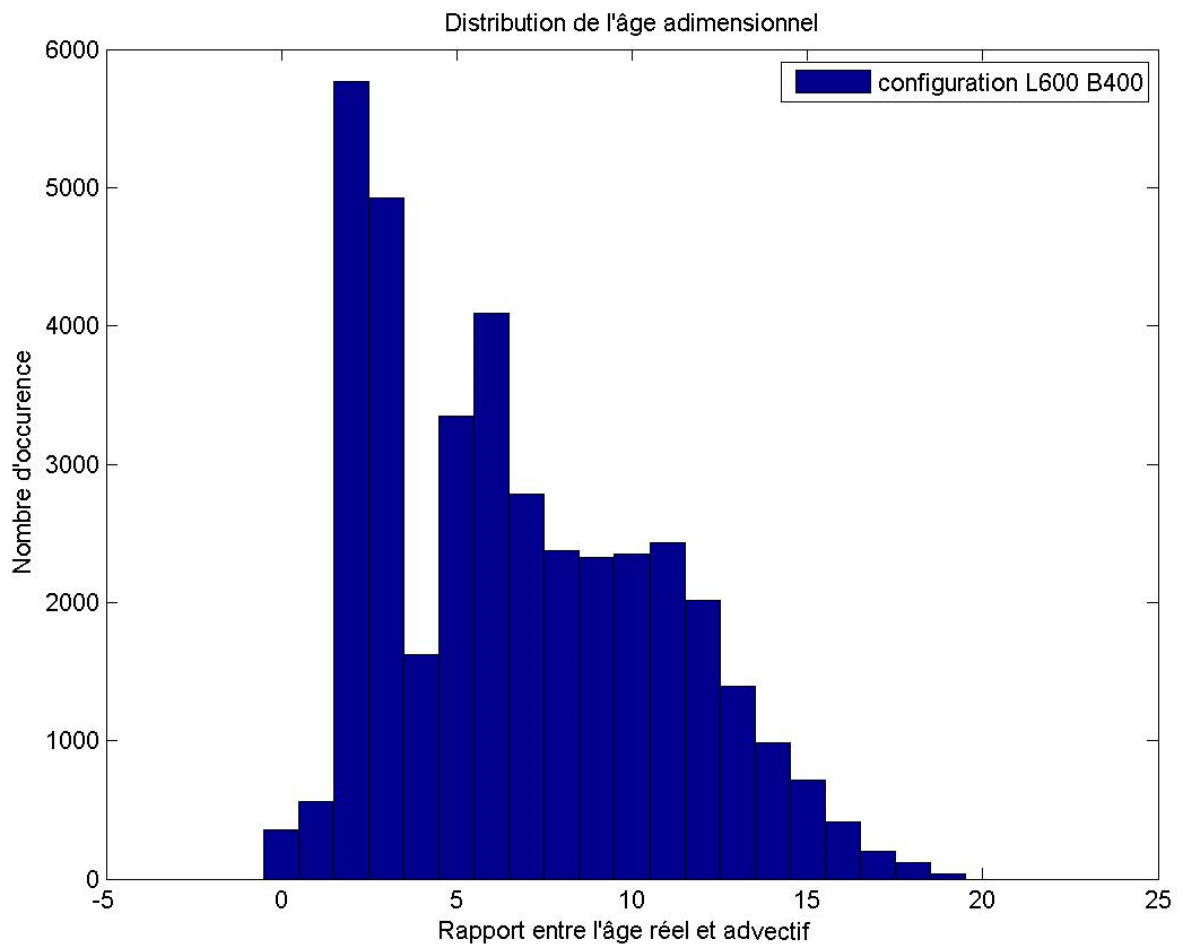


Figure 23 : Histogramme représentant la répartition de l'âge adimensionnel au sein du bassin L600-B400 pour  $k = variable$

Dans un second temps, afin de pouvoir comparer ces répartitions d'âge au sein d'une même ou de plusieurs configurations, une simple interpolation a été effectuée afin de visualiser la distribution de l'âge dans une même configuration. L'interpolation et les données fournies par Wolf ont été traitées via le logiciel Matlab. Pour une question de clarté, l'ensemble des codes Matlab sera consultable dans un document électronique joint à ce document texte. L'interpolation représente une courbe joignant les points haut et central des bâtonnets, comme illustré sur la figure suivante :

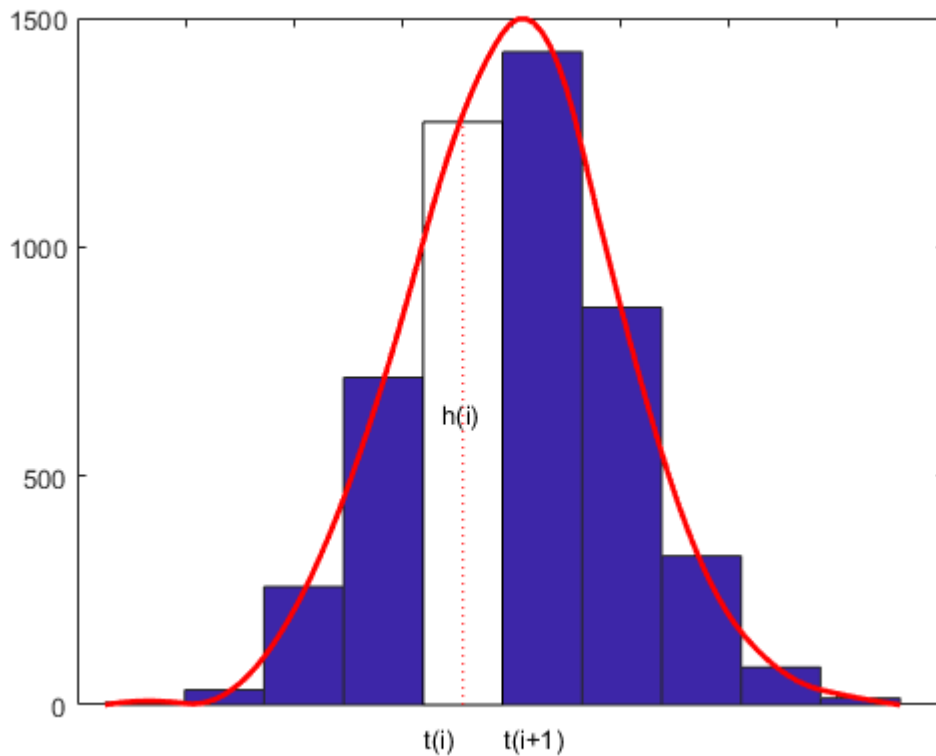


Figure 24 : Interpolation réalisée pour les histogrammes représentant la répartition de l'âge adimensionnel

L'interpolation, bien que minimaliste, permet d'obtenir sur un même graphe plusieurs répartitions d'âge et de pouvoir les comparer.

### 4.3.3 Test de sensibilité à la diffusion

Le coefficient de diffusion occupant une place importante dans le calcul de l'âge, nous avons décidé d'effectuer un test de sensibilité sur ce facteur. Dans ce but, le coefficient de diffusion a été multiplié par un coefficient « alpha ». Comme observé précédemment, le pattern d'âge tend à diminuer avec l'augmentation de la diffusion. Les figures suivantes représentent les résultats obtenus pour l'exemple du bassin  $L = 6$  m et  $B = 4$  m, c'est-à-dire les patterns de l'âge adimensionnel obtenus en fonction d'alpha, ainsi que l'interpolation de la distribution de l'âge adimensionnel, permettant ainsi de visualiser, sur un même graphe, pour un même alpha, l'ensemble des interpolations (voir figure 25).

Exemple de résultats obtenus, configuration L600-B400 :

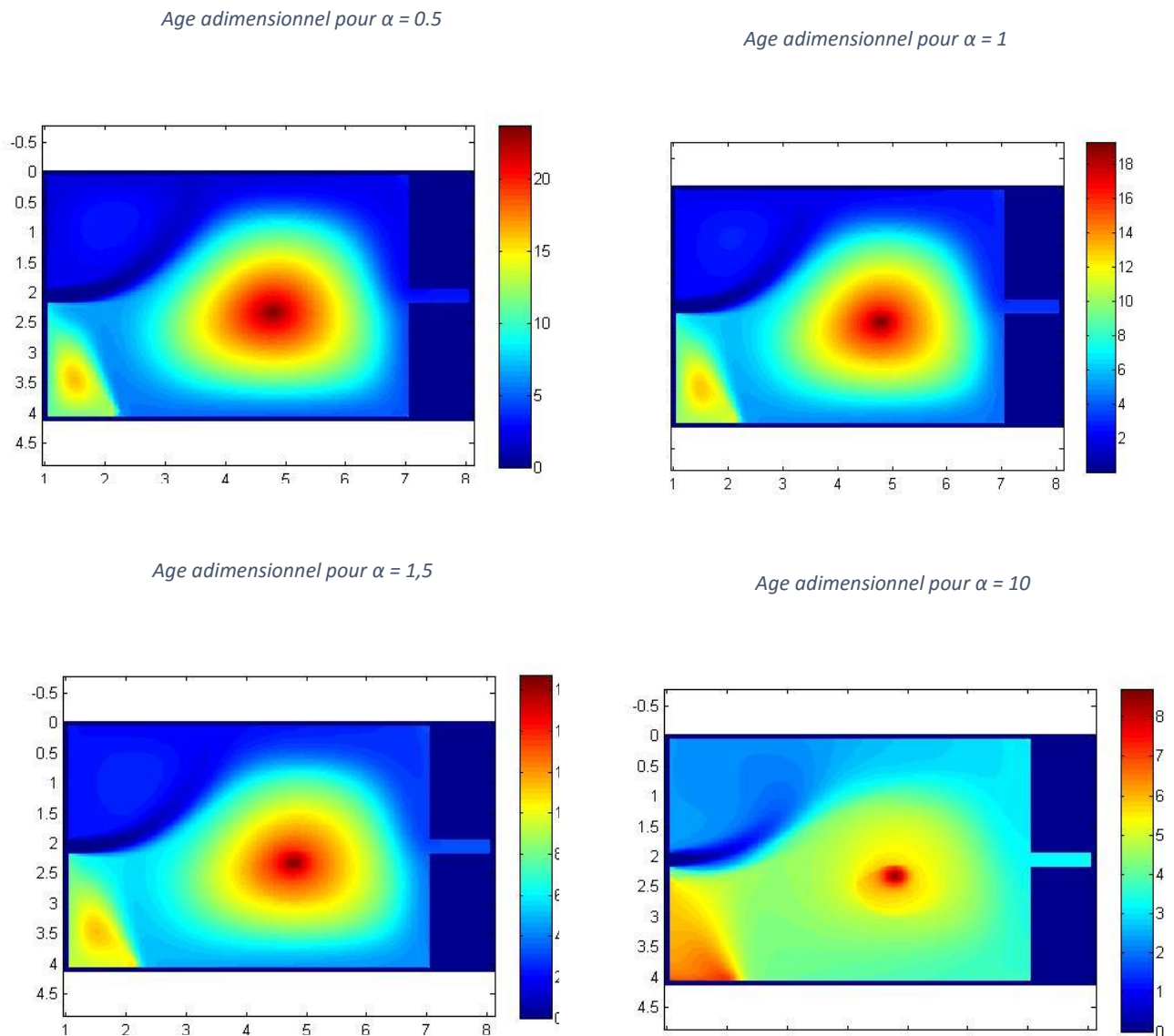


Figure 25 : Ensemble des patterns pour différents coefficients de diffusion

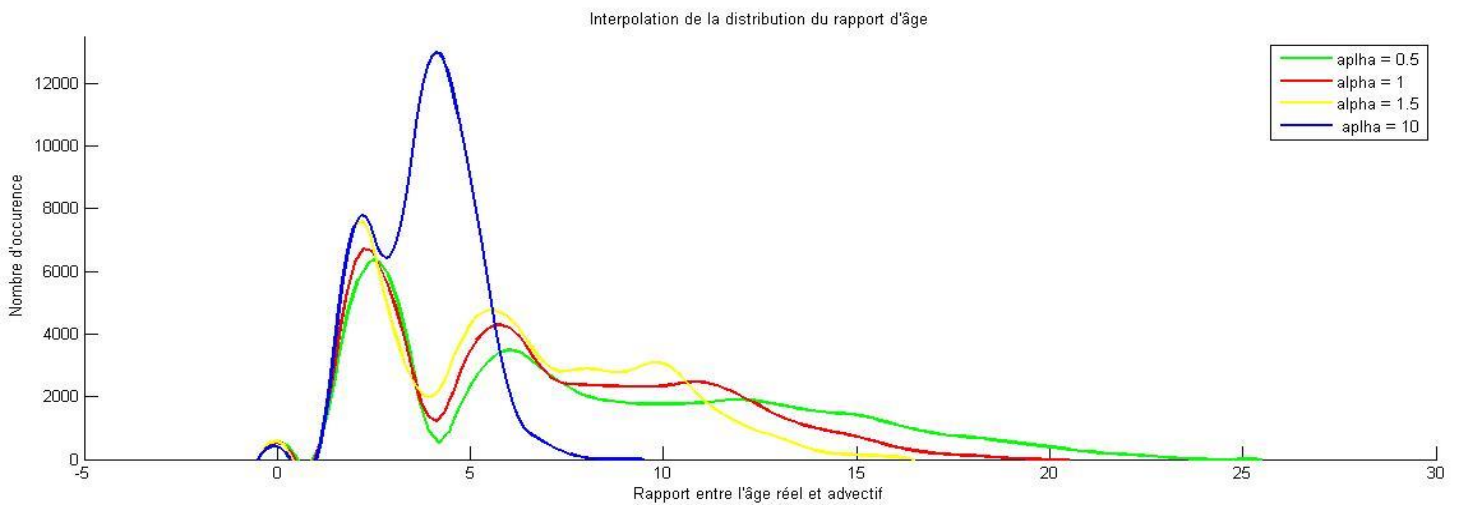


Figure 26 : Ensemble des interpolations de l'âge adimensionnel pour la configuration L600-B400

## 5. Observation et interprétation des résultats

La géométrie choisie des bassins rectangulaires permet de comparer la distribution de l'âge au sein de ces derniers par rapport à une des deux dimensions fixées, à savoir la longueur ou la largeur. Les simulations prises en compte en vue de comparer les résultats sont celles d'un alpha de 1. Une première approche est d'observer - ou non - des similitudes en ce qui concerne la distribution de l'âge pour des géométries à une dimension commune.

### 5.1 Observation pour une longueur fixée

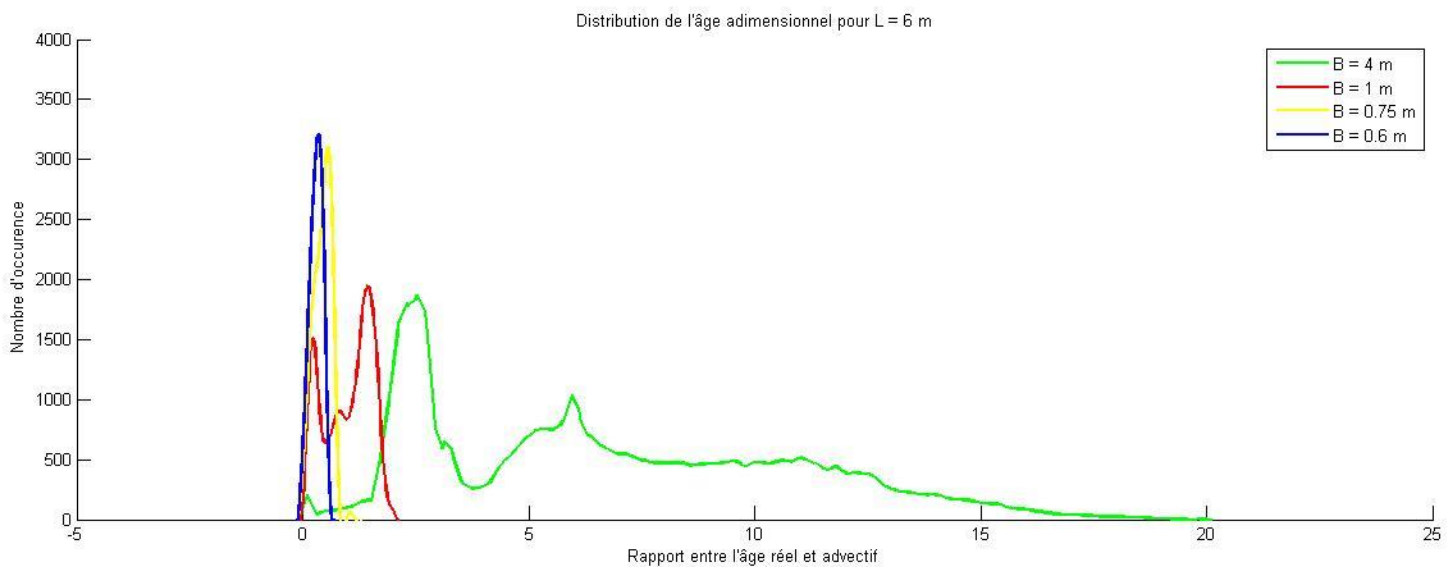


Figure 27 : Interpolations de la distribution de l'âge adimensionnel pour une longueur commune de 6 m

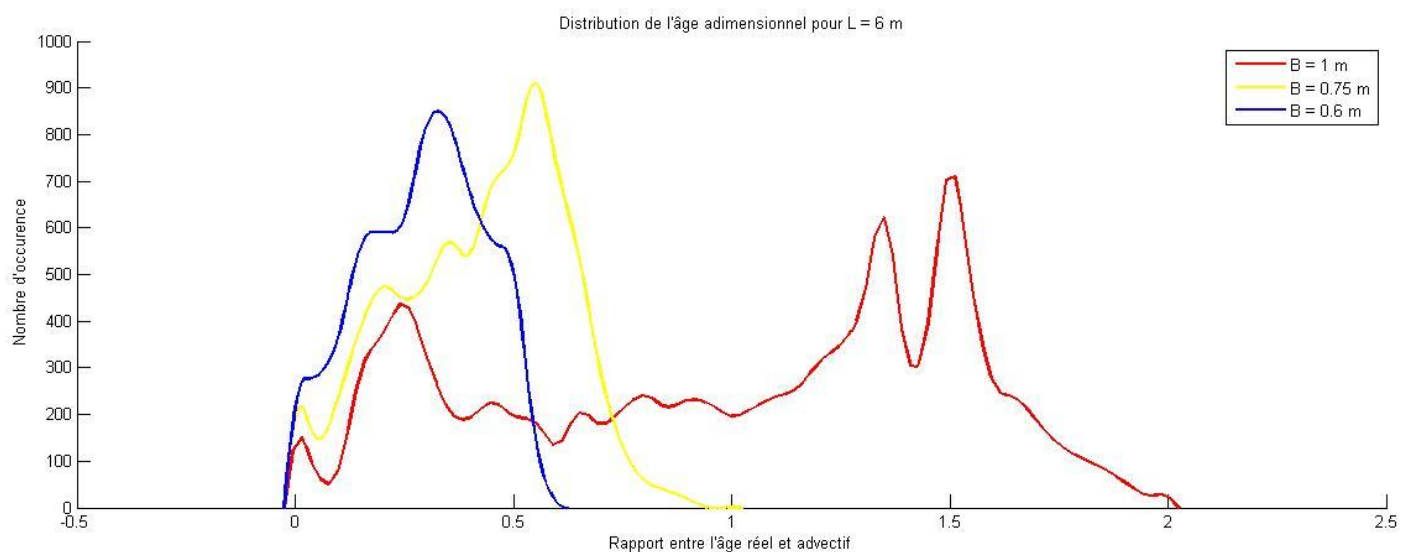


Figure 28 : Zoom sur une partie des interpolations de la distribution de l'âge adimensionnel pour une longueur commune de 6 m

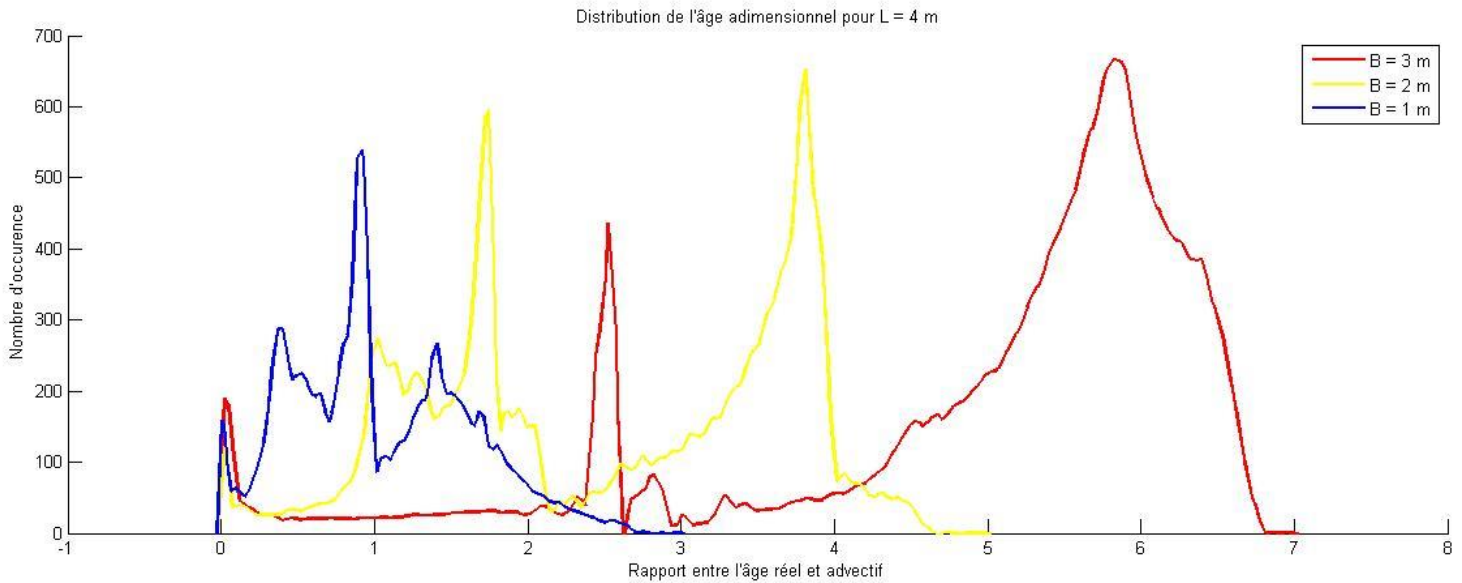


Figure 29 : interpolations de la distribution de l'âge adimensionnel pour une longueur commune de 4 m

Configurations	Vitesse d'entrée [m/s]	Age advectif [s]
L600-B400	0.02805	213.9
L600-B100	0.02806	213.83
L600-B075	0.02804	213.98
L600-B060	0.02807	213.75
L400-B300	0.0281	142.35
L400-B200	0.02805	142.60
L400-B100	0.02804	142.65

Figure 30 : Tableau récapitulatif de l'âge advectif déduit à partir de la longueur des bassins et la vitesse d'entrée

Observation :

Le pattern de l'âge augmente avec l'augmentation de la largeur pour une longueur fixée, ce qui semble être cohérent puisque l'augmentation de largeur privilégie davantage un mouvement des parcelles de fluides dans la direction « y ». Les interpolations des distributions de l'âge semblent avoir une forme commune pour une même longueur et des largeurs relativement proches, à l'exception donc des configurations L600-B400 et L600-B100.

## 5.2 Observation pour une largeur fixée

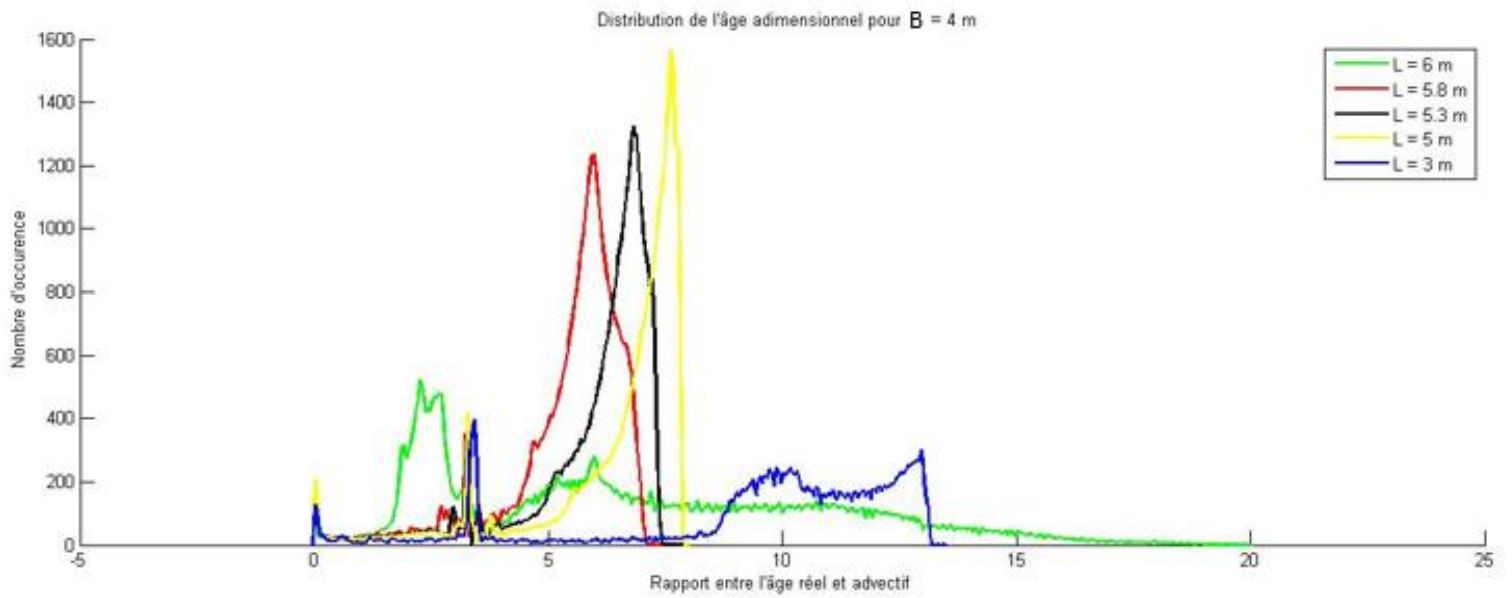


Figure 30 : interpolations de la distribution de l'âge adimensionnel pour une largeur commune de 4 m

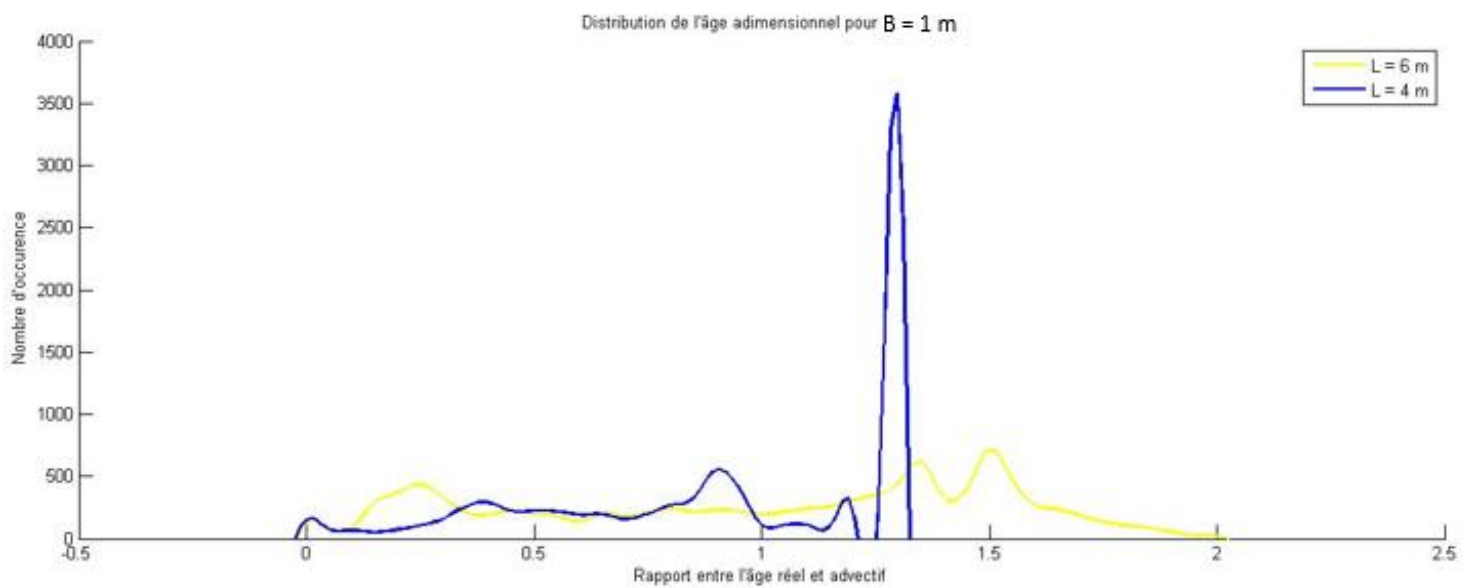


Figure 31 : interpolations de la distribution de l'âge adimensionnel pour une largeur commune de 1 m

Configurations	Vitesse d'entrée [m/s]	Age advectif [s]
L600-B400	0.02805	213.90
L580-B400	0.02805	206.77
L530-B400	0.02804	189.02
L500-B400	0.0281	177.94
L300-B400	0.02806	106.91
L600-B100	0.02806	213.83
L400-B100	0.02804	142.65

Figure 32 : Tableau récapitulatif de l'âge advectif déduit à partir de la longueur des bassins et la vitesse d'entrée

Observation :

On remarque aisément que les bassins présentant une géométrie relativement proche présentent une forme et une distribution communes. L'âge advectif était relié à la longueur, la différence entre ceux-ci impactant le résultat. La figure 30 montre qu'une augmentation de largeur n'indique pas inéluctablement une augmentation générale du pattern de l'âge.

Outre ces différentes observations, il est difficile de récolter davantage d'informations par la simple comparaison du pattern de l'âge adimensionnel en fixant uniquement une longueur. De plus, les figures 30 et 32 témoignent des fortes variations que peut prendre l'âge advectif à partir duquel est calculé l'âge adimensionnel (voir l'équation **40**). Il n'en demeure pas moins que ce raisonnement met en avant l'influence de la géométrie sur le pattern de l'âge. Effectivement, des études antérieures (voir section 3.1), déjà évoquées précédemment, ont démontré que diverses formes d'écoulement pouvaient se manifester dans les bassins en fonction de leur géométrie. Et c'est en fonction de ces types d'écoulement que la suite de cette étude va essayer de décrire le pattern de l'âge.

### 5.3 Impact de la géométrie sur le type d'écoulement

Nous essayerons donc d'analyser les patterns d'âge recueillis en fonction d'un facteur de forme pour lequel plusieurs observations ont déjà été effectuées quant à la forme de l'écoulement. A l'heure actuelle, ces écoulements ne sont pas encore parfaitement compris. Toutefois, différentes caractéristiques permettent de prédire la forme de l'écoulement. Son pattern dépendra du nombre de Froude à l'entrée du réservoir et de la géométrie du réservoir caractérisée par un facteur de forme – SF - tel que  $SF = L/\Delta B^{0.6}b^{0.4}$  par Dufresne et al. (2010a) avec les dimensions signalées à la figure 33.

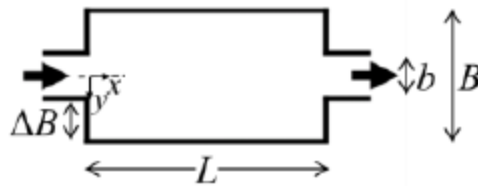


Figure 33 : paramètres pris en compte pour le calcul du facteur de forme

Peltier et al. (2014) ont montré que le pattern de l'écoulement peut être :

- Symétrique ( $F < 0.21$  et  $SF < 6.2$ ) : le jet est alors rectiligne, de l'entrée à la sortie, et une recirculation symétrique se développe alors de chaque côté du jet (Pattern S0).
- Asymétrique ( $SF > 8.1$ ) : Le jet est en contact avec un ou plusieurs points de la paroi en dépit de la symétrie et différentes tailles de zones de recirculation s'y développent (Pattern S1).
- Méandre ( $F > 0.21$  et  $SF < 6.2$ ) : Le jet oscille périodiquement et spatialement de l'entrée à la sortie du réservoir. Ces oscillations déforment légèrement les zones de recirculation en dehors du jet (Pattern A1).
- Instable : lorsque  $F$  est proche de  $0.21$  et  $SF < 6.2$  ou encore  $F > 0.21$  et  $6.2 < SF < 8.1$ , le régime du jet change de façon aléatoire. La même expérience peut conduire à un jet rectiligne, avec ou sans méandre (*Plug flow*), ou avoir un ou plusieurs points de contacts avec la paroi latérale (Pattern A2).

L'ensemble de ces patterns est repris à la figure 34 :

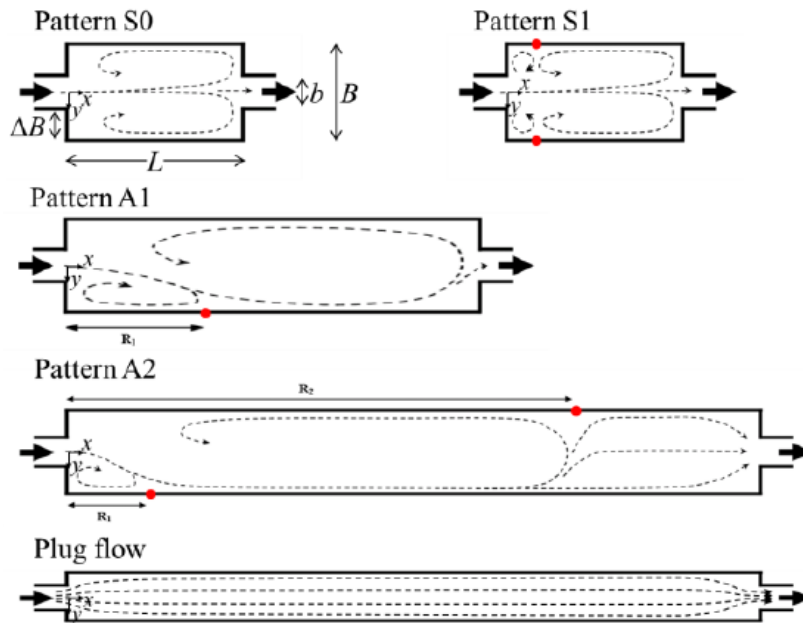
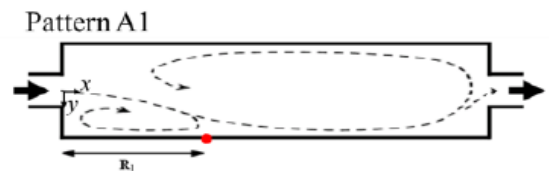
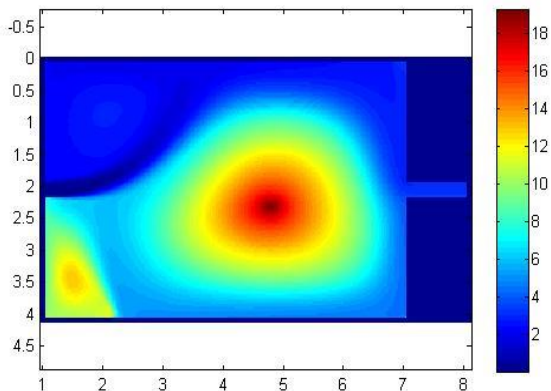


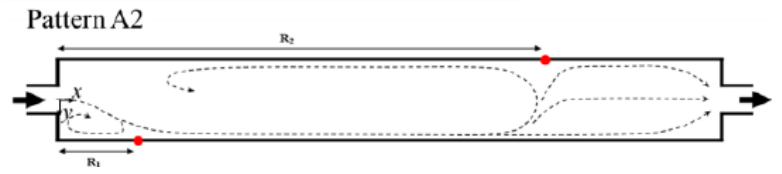
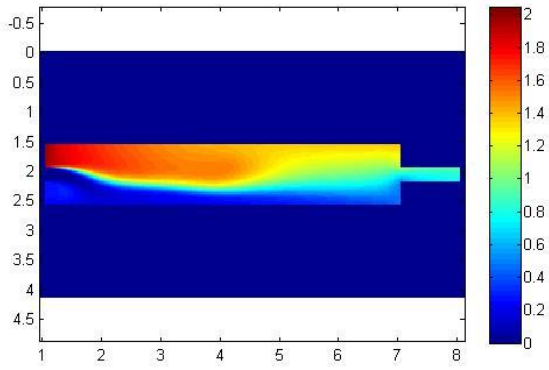
Figure 34 : L'ensemble des types d'écoulement

Afin d'avoir une première vue d'ensemble, les patterns d'âge adimensionnels, pour un alpha égal à 1, ont été placés en vis-à-vis avec le pattern de l'écoulement prédit par le facteur de forme et le nombre de Froude.

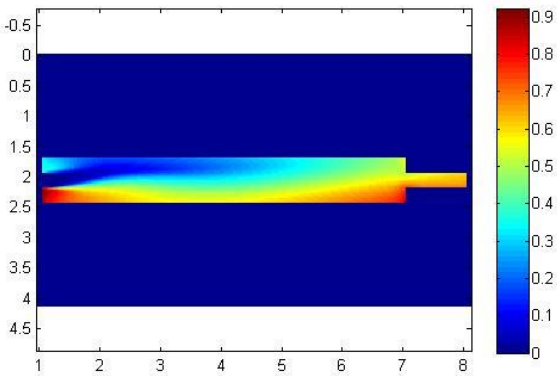
L600-B400



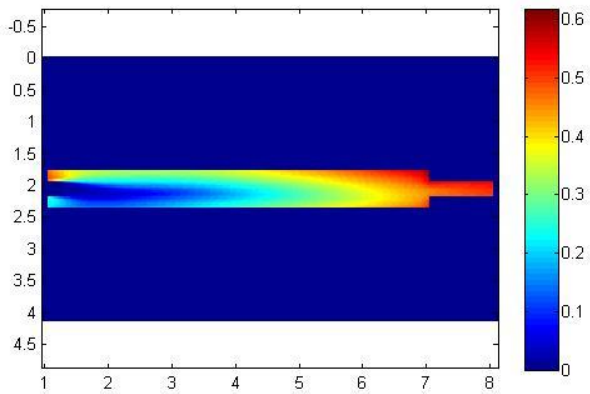
L600-B100



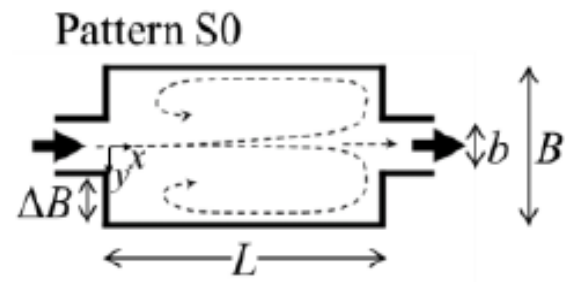
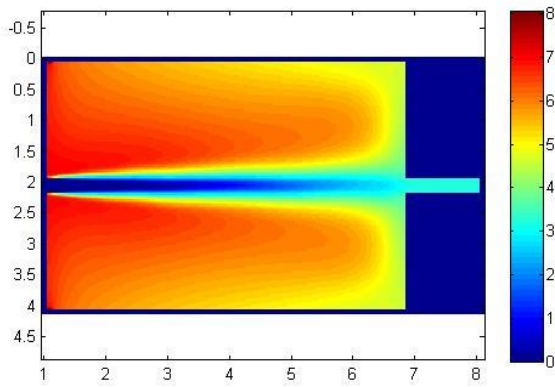
L600-B075



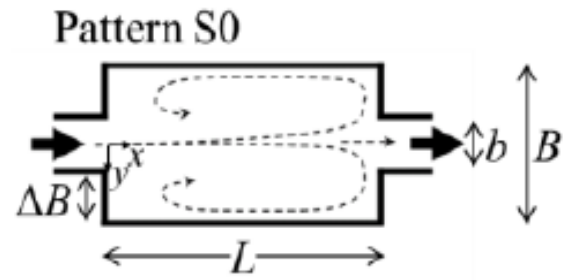
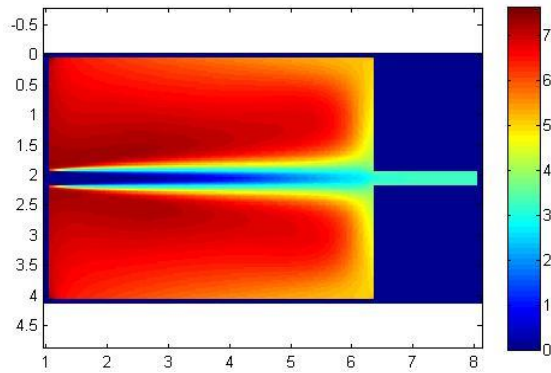
L600-B060



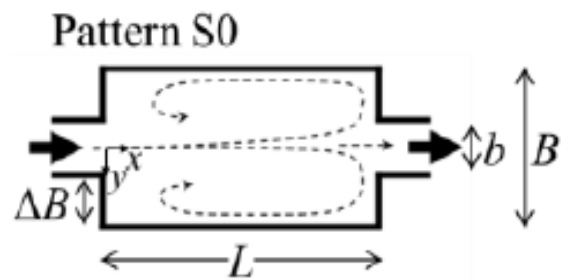
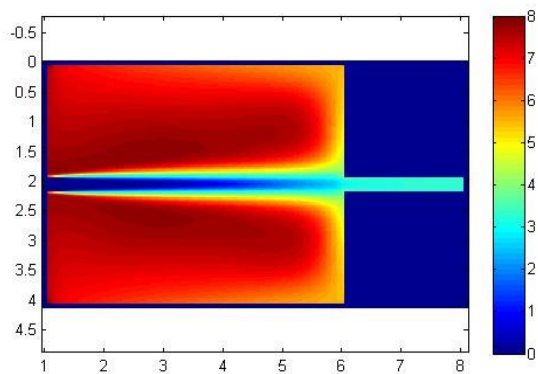
L580-B400



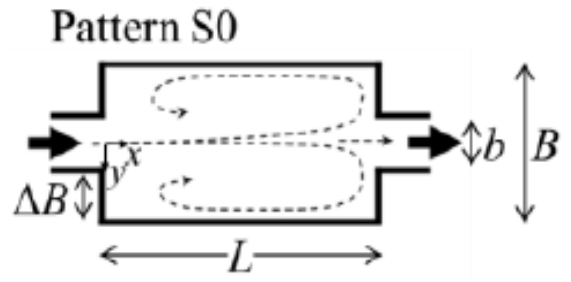
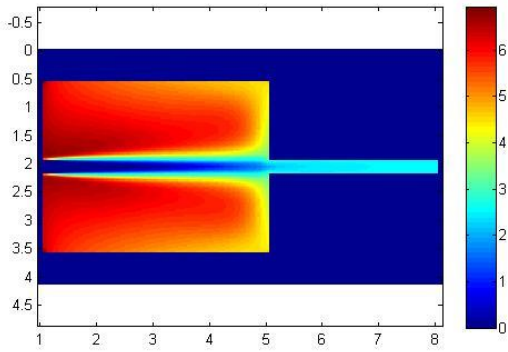
L530-B400



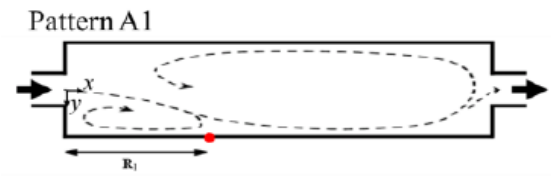
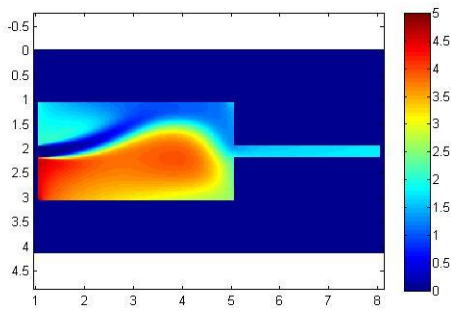
L500-B400



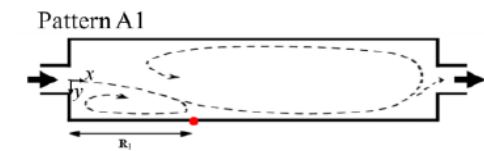
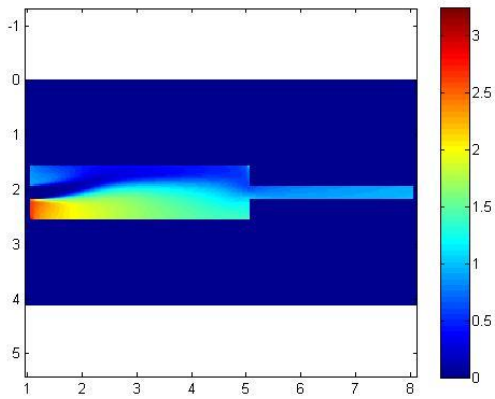
L400\_B300



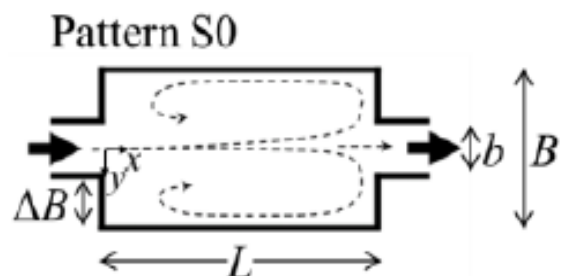
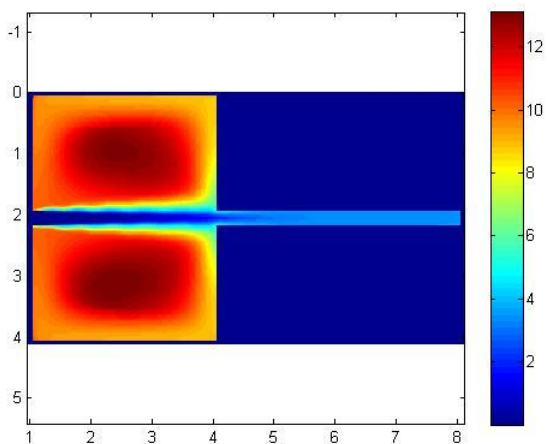
L400\_B200



L400\_B100



L300-B400



## 5.4 Interprétation des résultats

Le coefficient de diffusion étant déterminant dans le calcul de l'âge, il a été décidé d'effectuer un test de sensibilité sur ce facteur. Dans ce but, le coefficient de diffusion a été multiplié par un coefficient « alpha ». Cette section vise à identifier l'influence des phénomènes d'advection et de diffusion par rapport aux données récoltées sur l'âge.

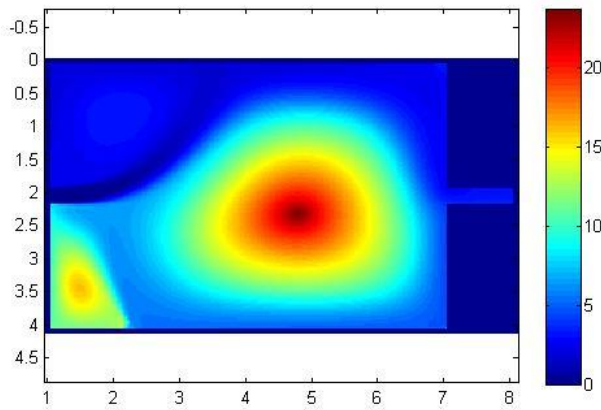
Les interprétations peuvent être similaires pour plusieurs géométries différentes. Il est donc judicieux de les regrouper en bloc en fonction du type d'écoulement déduit par le nombre de Froude et le facteur décrit à la section 5.3.

<b>Configurations</b>	<b>Type d'écoulement déduit</b>
<b>L600-B400</b>	<b>A1</b>
<b>L400-B200</b>	<b>A1</b>
<b>L400-B100</b>	<b>A1</b>
<b>L600-B100</b>	<b>A2</b>
<b>L600-B075</b>	<b>A2</b>
<b>L600-B060</b>	<b>A2</b>
<b>L580-B400</b>	<b>S0</b>
<b>L530-B400</b>	<b>S0</b>
<b>L500-B400</b>	<b>S0</b>
<b>L400-B300</b>	<b>S0</b>
<b>L300-B400</b>	<b>S0</b>

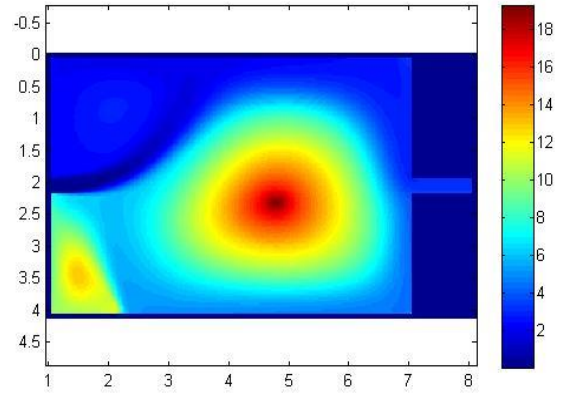
Figure 35 : Tableau regroupant les configurations par type d'écoulement

### 5.4.1 Configuration L600\_B400 – type A1

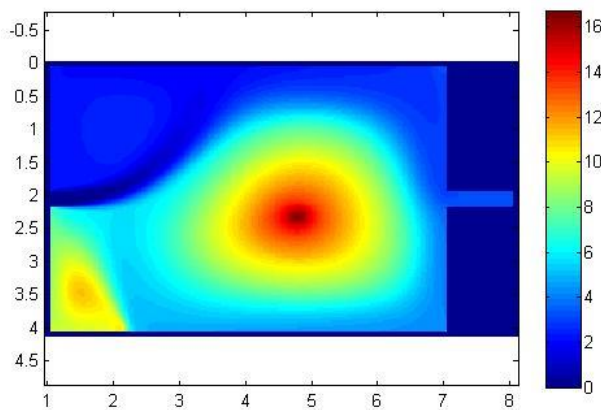
Age adimensionnel pour  $\alpha = 0.5$



Age adimensionnel pour  $\alpha = 1$



Age adimensionnel pour  $\alpha = 1,5$



Age adimensionnel pour  $\alpha = 10$

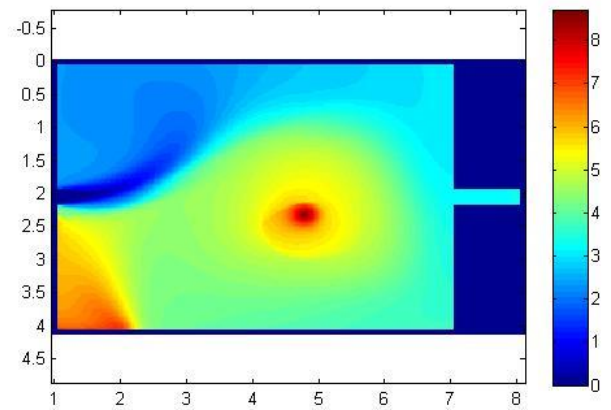


Figure 36 : Ensemble des patterns d'âge adimensionnel pour différents coefficients de diffusion

Comme observé précédemment, le pattern d'âge tend à diminuer avec l'augmentation de la diffusion. De manière générale, une diffusion plus importante permettra une propagation plus rapide vers la sortie.

L'interpolation des histogrammes, tirée des graphes repris à la figure 36, permet de visualiser l'ensemble des répartitions pour une même configuration avec un coefficient de diffusion variable (voir ci-dessous figure 37).

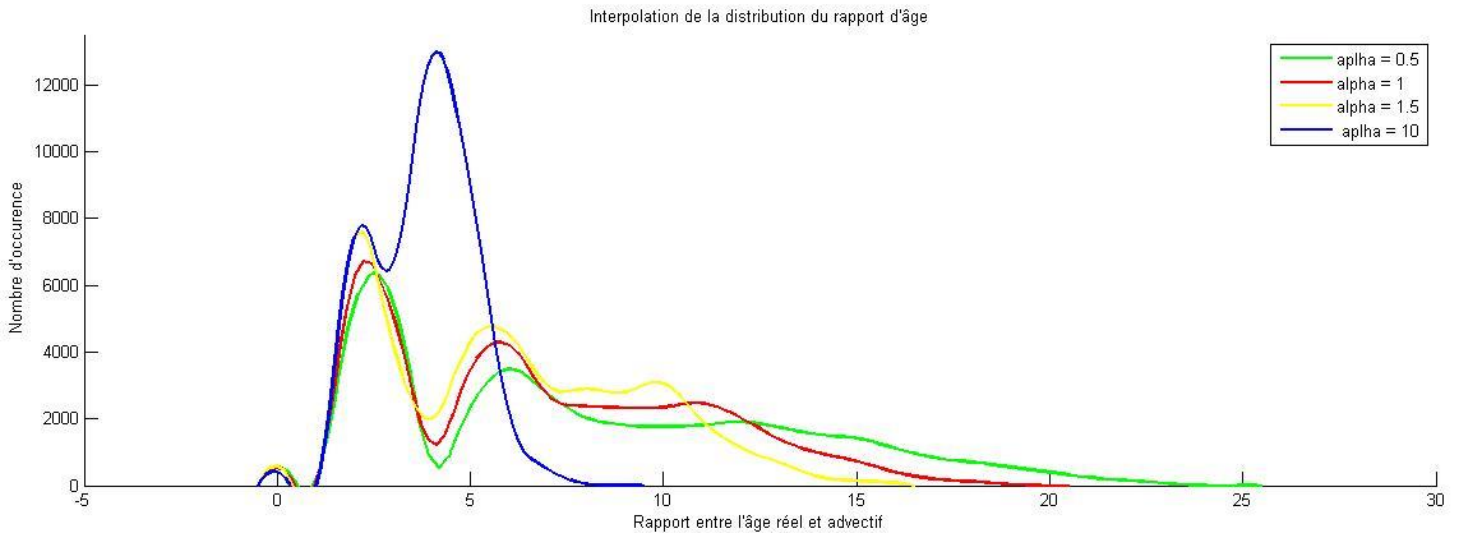


Figure 37 : Interpolation des histogrammes de répartition de l'âge adimensionnel pour la configuration B400-L600

Les interpolations représentant la distribution des valeurs adimensionnelles présentent, pour une même configuration, une forme de répartition similaire pour différentes matrices de diffusion relativement proches ( $\alpha = 0.5, 1, 1.5$ ), comme nous pouvons l'observer sur la figure 37.

Les interpolations présentent par ailleurs deux « pics », c'est-à-dire deux parties distinctes, résultat qui avait été prédit par l'hypothèse suivante : « *une première partie de l'ensemble des parcelles de fluides sera déviée mais atteindra la sortie avant de pénétrer dans la zone d'influence du vortex. Tandis que la seconde partie des parcelles de fluides pénétrera dans le vortex, augmentant ainsi de manière significative le temps écoulé à l'intérieur du bassin* » et allant jusqu'à un rapport d'âge trois fois plus important (dans cette présente configuration) entre les parcelles de fluide au centre du vortex et celles simplement déviées jusqu'à la sortie.

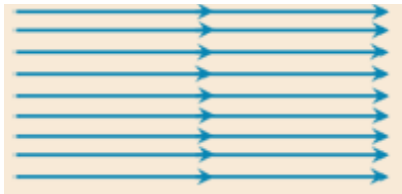
Le creux situé entre ces deux pics sur les courbes comprend les parcelles de fluide situées à l'interface entre le mouvement tourbillonnaire et le mouvement simplement dévié. Ce minima peut s'expliquer par le fait qu'une parcelle de fluide en périphérie du vortex pourra rejoindre l'écoulement simplement dévié ou continuera son mouvement tourbillonnaire. De ce fait, l'âge des parcelles de fluide qui auront quitté ce mouvement oscillera entre celles qui auront été simplement déviées et celles qui poursuivront leur trajectoire à travers le vortex.

Il est également important de souligner qu'une diffusion relativement faible fournira un second pic moins élevé que le premier, alors qu'une augmentation de diffusion aura tendance à contrebalancer cette inégalité. Il n'est pas aisé de décrire ce phénomène par interprétation physique. Toutefois, nous pouvons émettre l'hypothèse qu'une augmentation de diffusion va diminuer l'impact de l'advection, diminuant ainsi la différence entre le mouvement simplement dévié et le mouvement tourbillonnaire. Cet écart étant amoindri, les parcelles de fluides situées à l'interface de ces deux mouvements distincts auraient donc moins tendance à quitter le vortex.

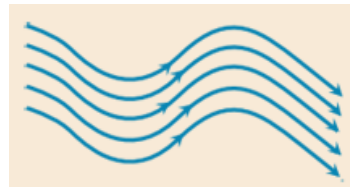
Une diffusion relativement faible privilégierait alors l'impact de l'écoulement simplement dévié alors qu'une diffusion relativement élevée privilégierait plutôt celui du mouvement tourbillonnaire, les patterns d'âge présents à la figure 36 allant d'ailleurs dans ce sens.

**N.B :**

- L'écoulement « simplement dévié » s'apparente à un écoulement laminaire lorsqu'il est rectiligne et à un écoulement turbulent dans sa partie courbée.

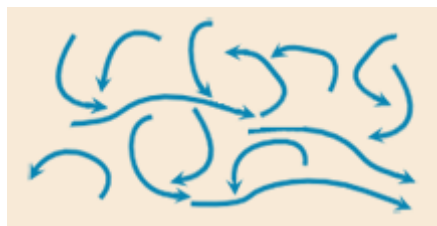


*Filets fluides dans un écoulement laminaire*



*Filets fluides dans un écoulement turbulent*

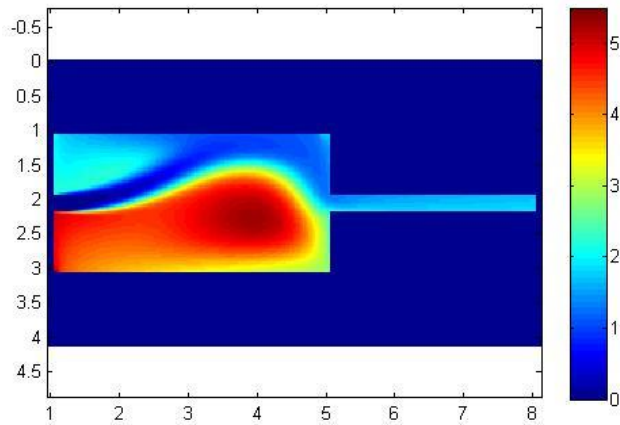
- L'écoulement tourbillonnaire fera référence à l'écoulement présent dans le vortex.



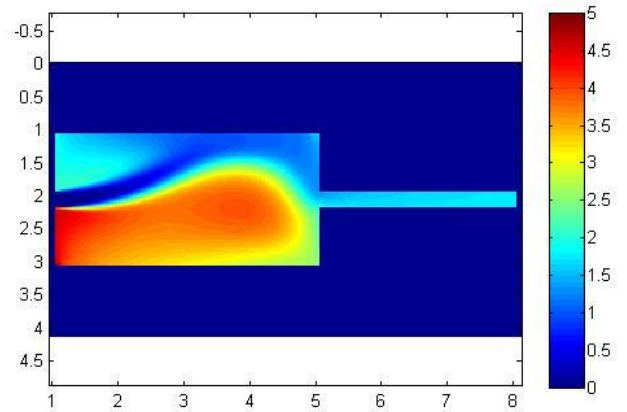
*Filets fluides dans un écoulement tourbillonnaire*

### 5.4.2 Configuration L400\_B200 - type A1

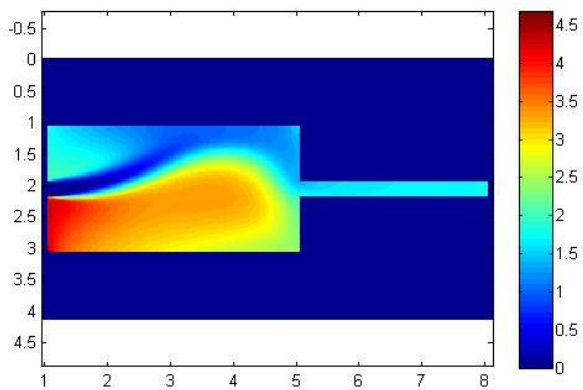
Rapport d'âge pour  $\alpha = 0.5$



Rapport d'âge pour  $\alpha = 1$



Rapport d'âge pour  $\alpha = 1,5$



Rapport d'âge pour  $\alpha = 10$

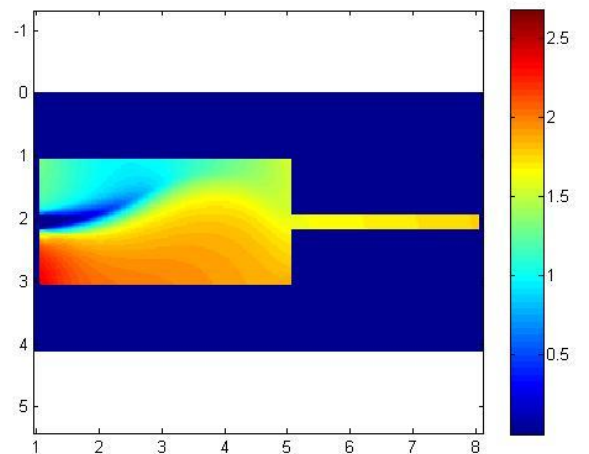


Figure 38 : Ensemble des patterns d'âge adimensionnel pour différents coefficients de diffusion

Comme observé précédemment, le pattern d'âge tend à diminuer avec l'augmentation de la diffusion.

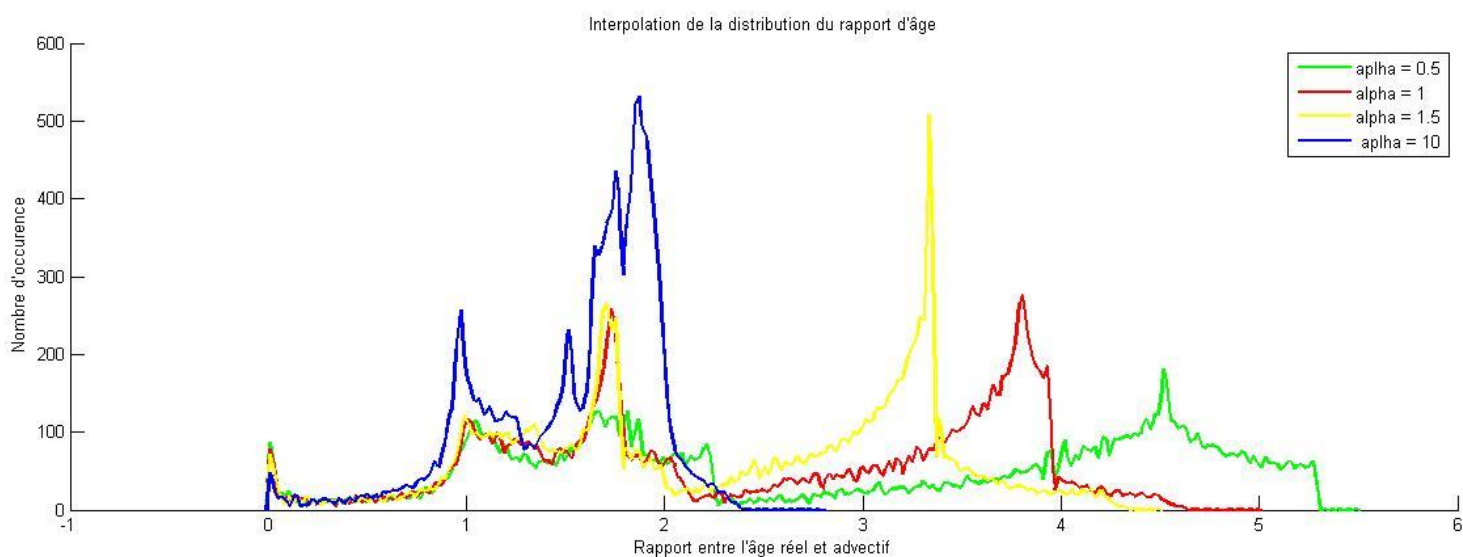


Figure 39 : Interpolation des histogrammes de répartition de l'âge adimensionnel pour la configuration B400-L200

De manière similaire à la configuration précédente et bien que la distinction soit moins visible, nous pouvons repérer deux parties distinctes dans les courbes reprises à la figure 39. L'augmentation de diffusion diminue les disparités en termes d'âge des parcelles de fluide et semble une fois encore privilégier l'impact du mouvement tourbillonnaire. Nous pouvons observer qu'une diminution de la diffusion (courbe verte) tend une nouvelle fois à augmenter la distinction entre les parcelles de fluides suivant l'écoulement simplement dévié et celles soumises au vortex.

5.4.3 Configuration L400\_B100 – type A1

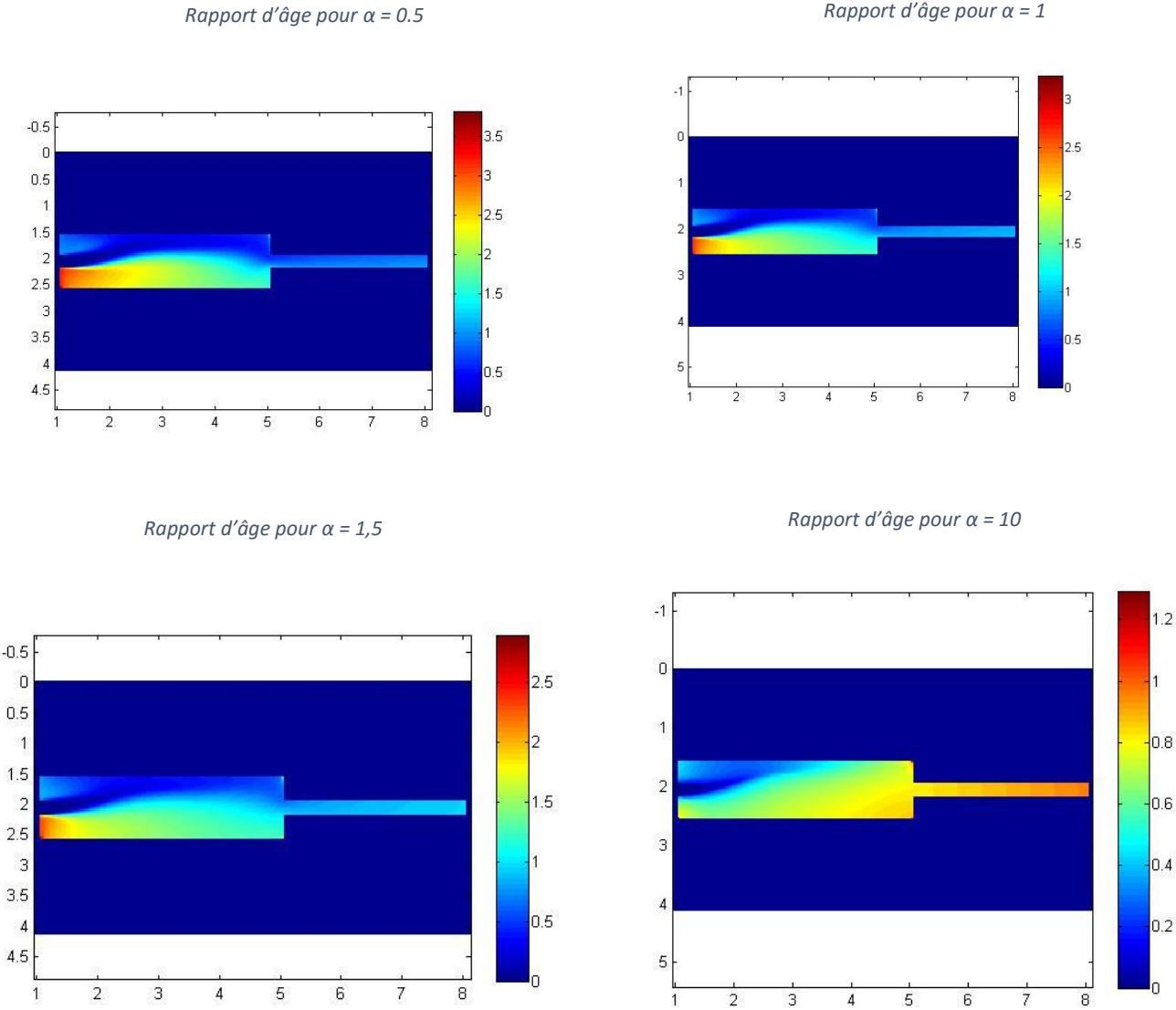


Figure 40 : Ensemble des patterns d'âge adimensionnel pour différents coefficients de diffusion

Comme observé précédemment, le pattern d'âge tend à diminuer avec l'augmentation de la diffusion.

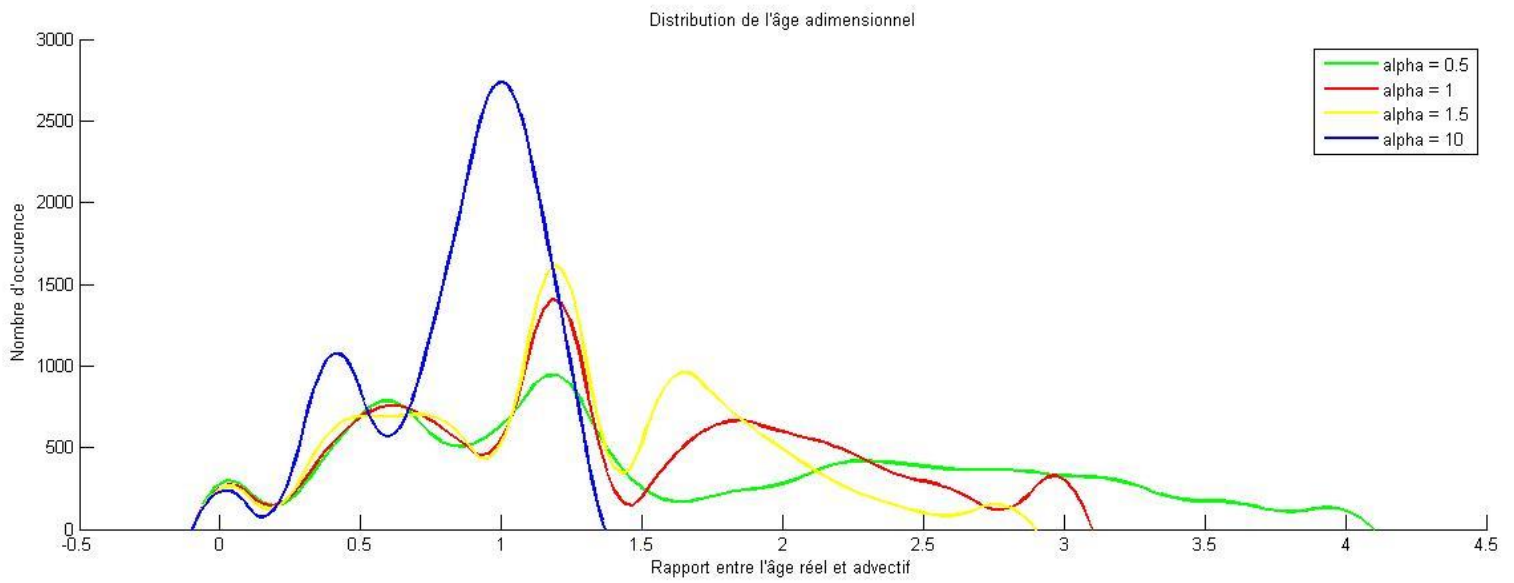


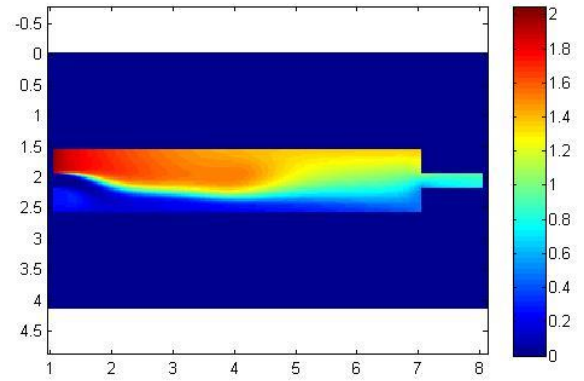
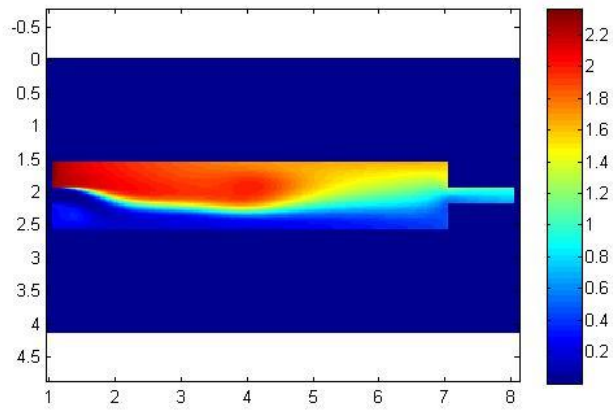
Figure 41 : Interpolation des histogrammes de répartition de l'âge adimensionnel pour la configuration B400-L200

L'observation est la même que précédemment.

#### 5.4.4 Configuration L600\_B100-Type A2

Rapport d'âge pour  $\alpha = 0.5$

Rapport d'âge pour  $\alpha = 1$



Rapport d'âge pour  $\alpha = 1,5$

Rapport d'âge pour  $\alpha = 10$

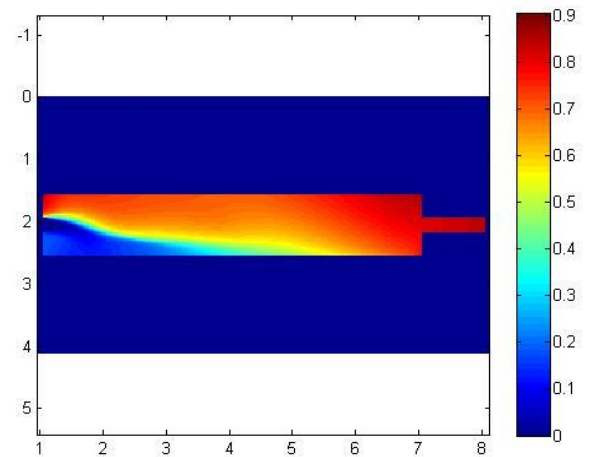
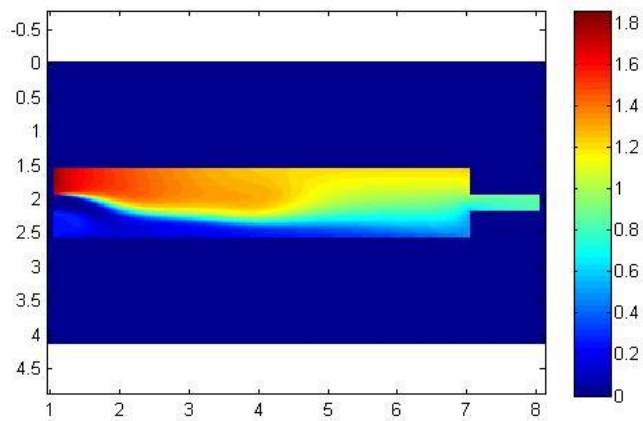


Figure 42 : Ensemble des patterns d'âge adimensionnel pour différents coefficients de diffusion

Une fois encore le pattern d'âge tend à diminuer avec l'augmentation de la diffusion.

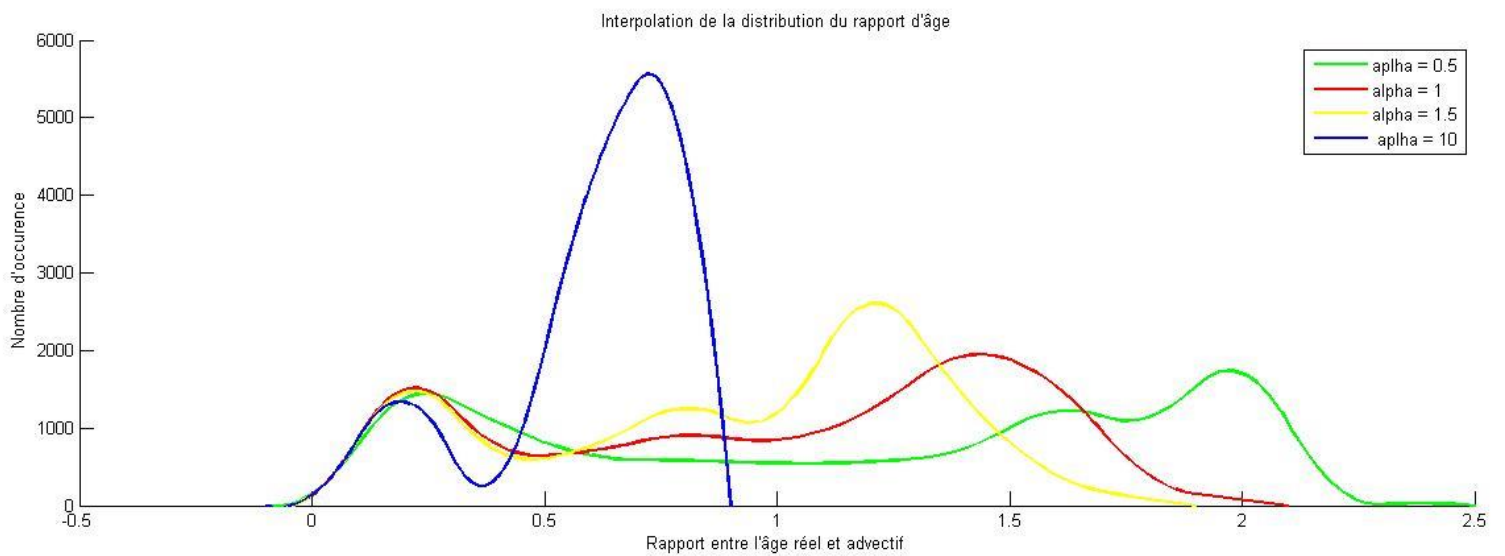


Figure 43 : Interpolation des histogrammes de répartition de l'âge adimensionnel pour la configuration B100-L600

De manière plus disparate, nous pouvons une nouvelle fois observer la présence de deux parties distinctes en raison de la présence d'un vortex et d'un écoulement simplement dévié. Les explications quant à l'âge des parcelles de fluides situées à l'interface des deux mouvements se confirment. Le type d'écoulement dans cette configuration est de type A2 comme présenté à la figure 44.

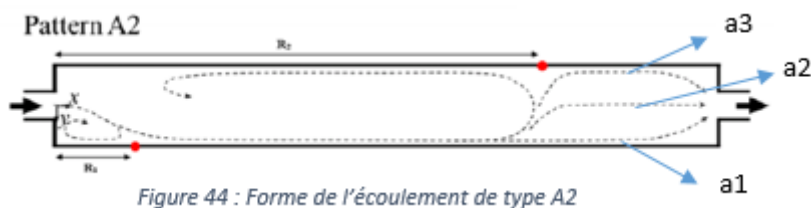


Figure 44 : Forme de l'écoulement de type A2

Avec :

$a_i$  = Age selon la trajectoire 1,2,3

Faisant référence aux hypothèses précédentes, les parcelles de fluides les plus proches du mouvement simplement dévié sont susceptibles d'avoir un âge inférieur à celles plus éloignées, ce que confirme le pattern de l'âge adimensionnel où  $a_1 < a_2 < a_3$  en termes d'âge adimensionnel.

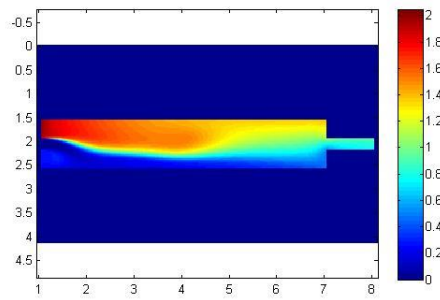


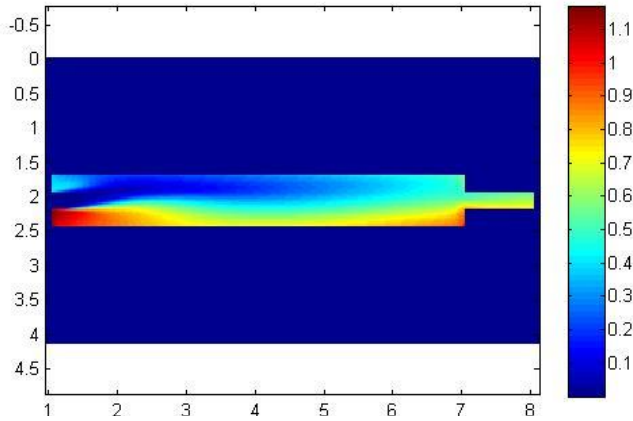
Figure 45 : pattern d'âge adimensionnel pour  $\alpha = 1$

Deux pics sont également présents. De la même manière que pour la configuration précédente, nous pouvons distinguer une partie des parcelles de fluides présentant un âge relativement faible, celles-ci atteignant la sortie en suivant un écoulement simplement dévié, d'une autre partie qui sera influencée par le mouvement tourbillonnaire et aura un âge relativement élevé. Les patterns d'âge pour des alphas proches de 1 donneront un pattern de circulation A2 représenté à la figure 45. Une diffusion réduite présente alors un pattern d'âge atteignant davantage des âges adimensionnels plus importants au centre du vortex, l'échange entre la zone de recirculation tourbillonnaire étant diminué par la diminution de la diffusion.

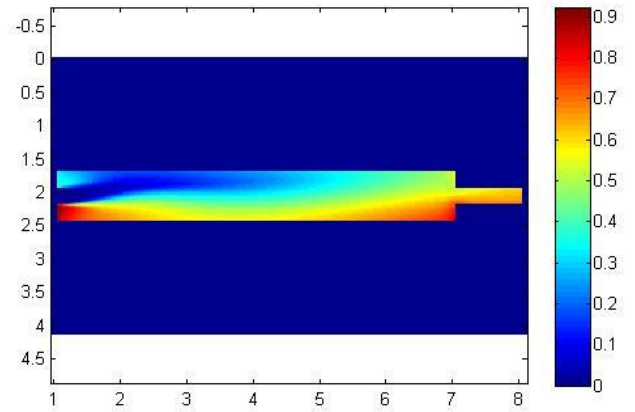
L'augmentation de diffusion ne permet toutefois plus d'avoisiner l'écoulement selon cette forme déduite par les paramètres de facteurs de forme et du nombre  $\nu$  précédemment. Le vortex se situant entre les deux points de rattachement (en rouge sur la figure 44) semble s'étendre à l'entièreté du bassin. Une fois encore, le phénomène de diffusion semble prendre le dessus sur le phénomène d'advection et la recirculation simplement déviée perd de son influence.

### 5.4.5 Configuration L600\_B075-Type A2

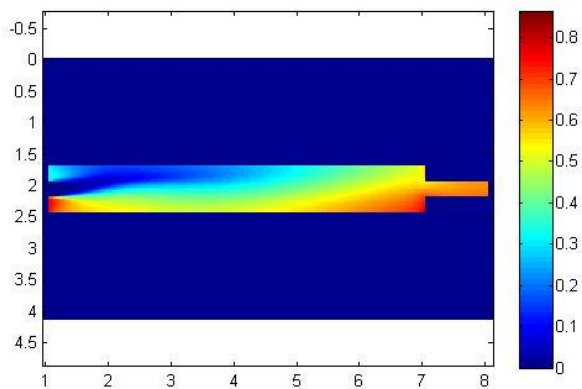
Rapport d'âge pour  $\alpha = 0.5$



Rapport d'âge pour  $\alpha = 1$



Rapport d'âge pour  $\alpha = 1.5$



Rapport d'âge pour  $\alpha = 10$

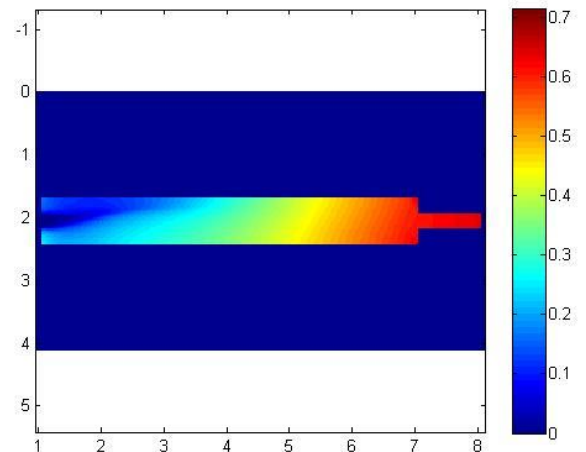


Figure 46 : Ensemble des patterns d'âge adimensionnel pour différents coefficients de diffusion

Même si le phénomène est moins visible par rapport aux configurations précédentes, l'augmentation de la diffusion tend une nouvelle fois à réduire le pattern de l'âge.

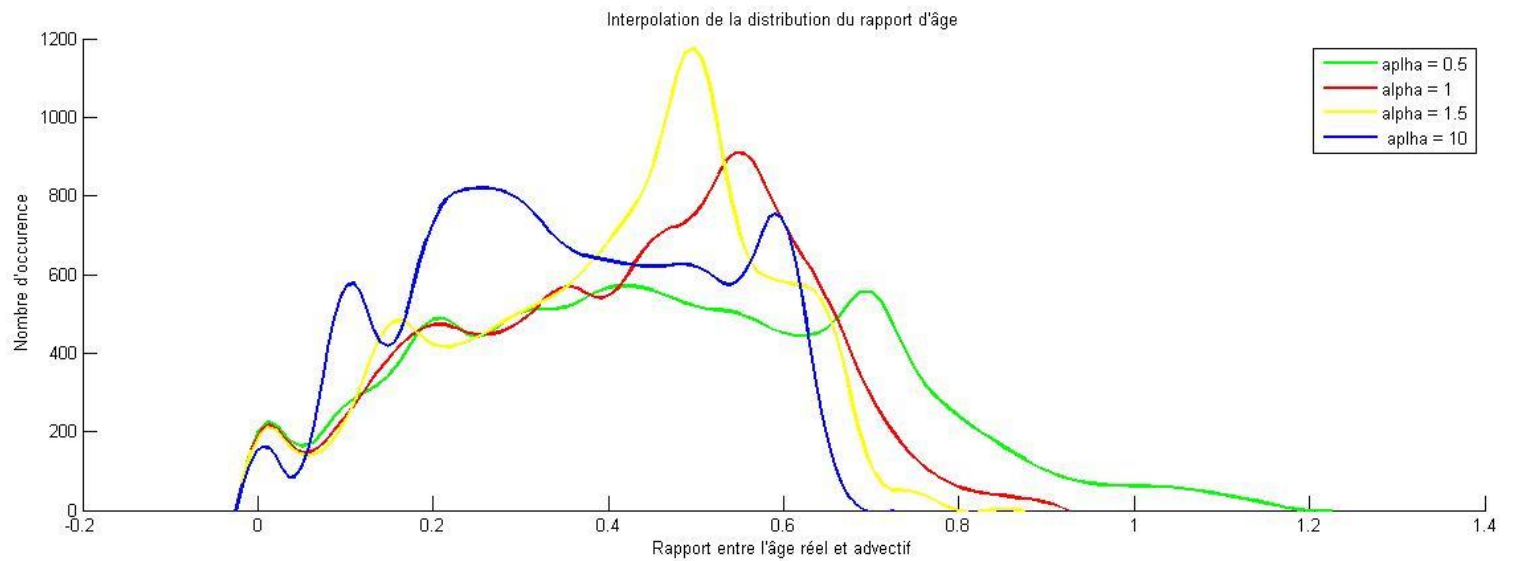


Figure 47 : Interpolation des histogrammes de répartition de l'âge adimensionnel pour la configuration B600-L075

La forme des courbes est ici moins explicite en raison de la faible variation d'âge entre les parcelles de fluides. La caractérisation de l'écoulement vu précédemment préconise une forme d'écoulement de type A2, ce qui ne semble toutefois pas cohérent avec le pattern de l'âge.

Bien qu'une zone de recirculation semble s'observer dans la partie inférieure sur les simulations, il semblerait que le vortex ne dispose pas de l'espace nécessaire à son développement, ce qui était davantage le cas de la simulation précédente. Le pattern de l'âge préconiserait plutôt un pattern d'écoulement de type *plug flow* (voir figure 48) :



Figure 48 : Forme de l'écoulement de type *plug flow*

Remarquons également que l'âge adimensionnel maximal avoisine l'unité signifiant que les parcelles de fluides franchissent le bassin de manière quasi linéaire. La géométrie du bassin ne permet donc pas de distinguer deux écoulements distincts, l'un simplement dévié et l'autre tourbillonnaire. Par conséquent, la diffusion aura moins d'impact. La configuration suivante, présentant une géométrie semblable, peut être commentée de manière similaire.

#### 5.4.6 Configuration L600\_B060-Type A2

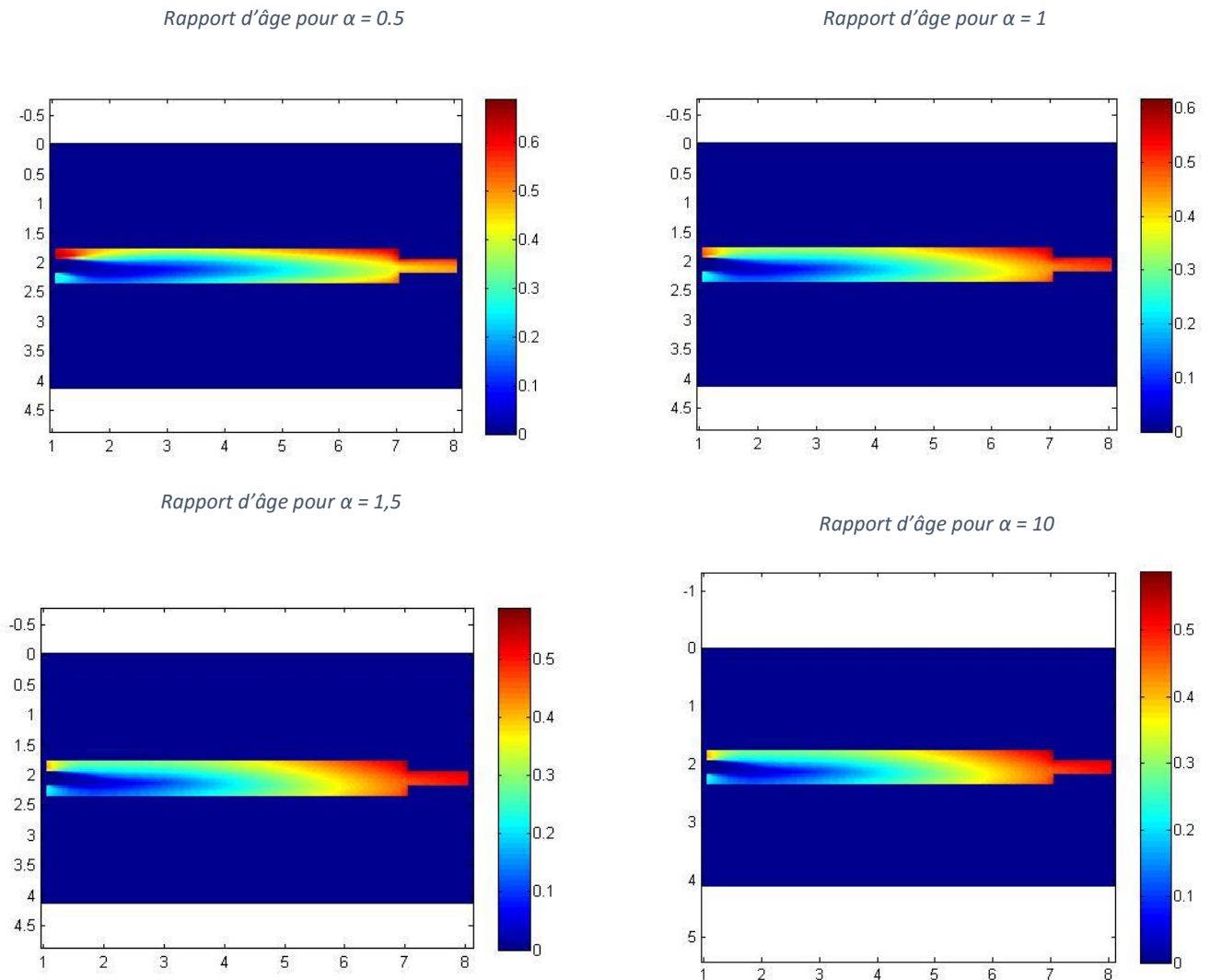


Figure 49 : Ensemble des patterns d'âge adimensionnel pour différents coefficients de diffusion

L'augmentation de la diffusion tend une nouvelle fois à réduire le pattern de l'âge, de manière encore moins significative que la configuration précédente. La figure 28, vue précédemment, montre qu'une réduction de largeur réduit la disparité pour une même longueur pour autant que le type d'écoulement estimé soit identique.

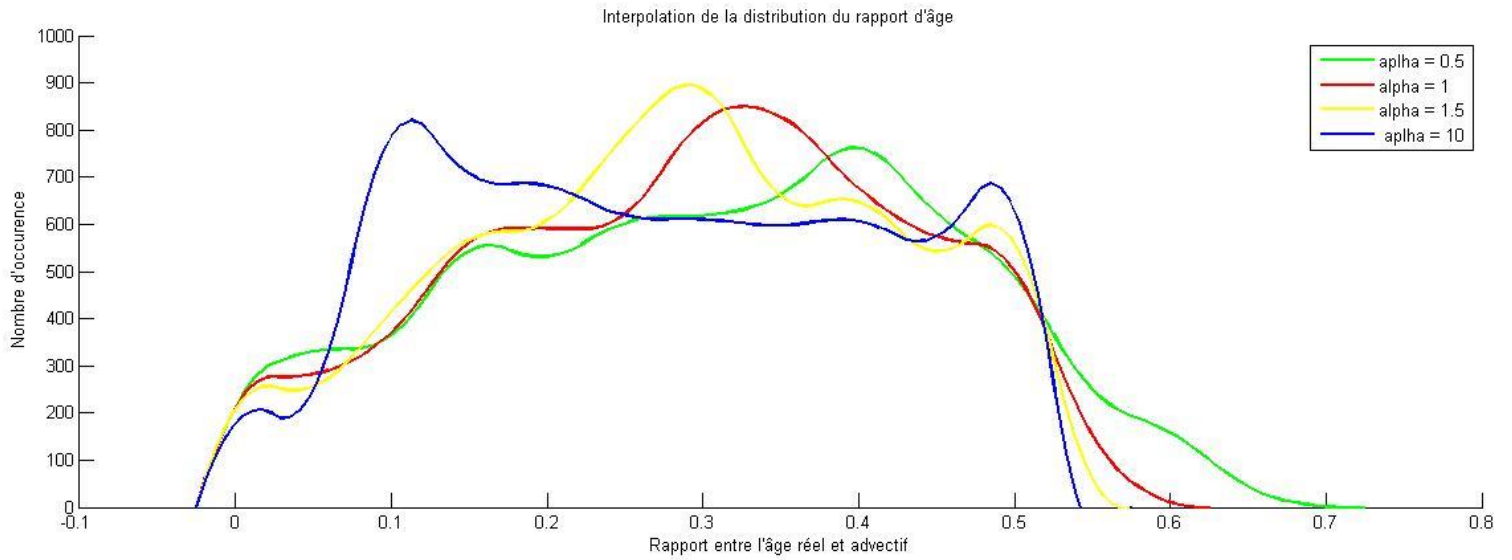
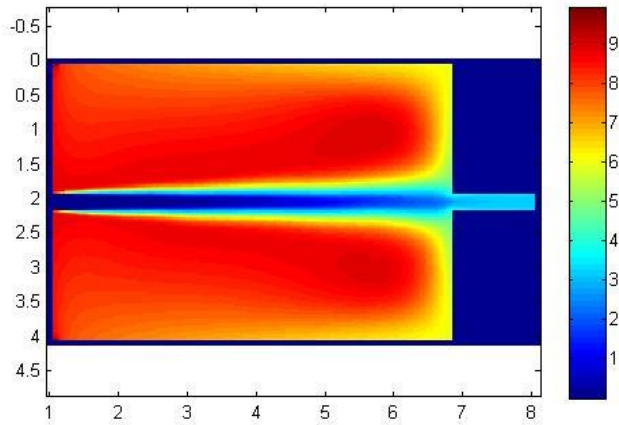


Figure 50 : Interpolation des histogrammes de répartition de l'âge adimensionnel pour la configuration B600-L075

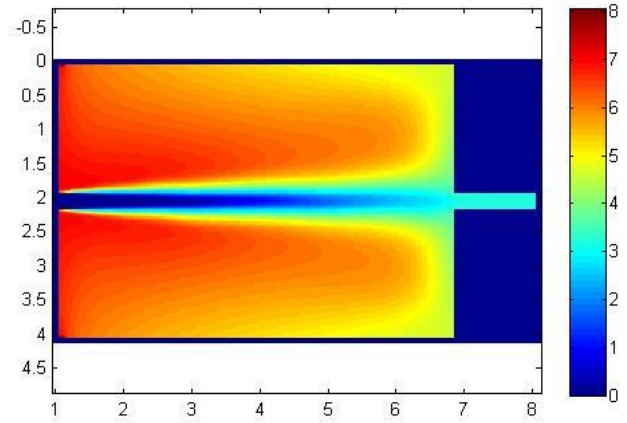
La distribution de l'âge au sein de cette configuration ne laisse cette fois plus supposer la présence de deux parties distinctes (voir figure 50). En effet, les patterns d'âge repris à la figure 49 présentent plutôt un écoulement de type *plug flow* (figure 48) avec une distinction plus réduite entre la partie supérieure et la partie inférieure. La présence estimée d'un vortex n'est plus aussi manifeste que pour les formes d'écoulements prédites du même type. L'écoulement est ici quasi rectiligne.

### 5.4.7 Configuration L580\_B400-Type S0

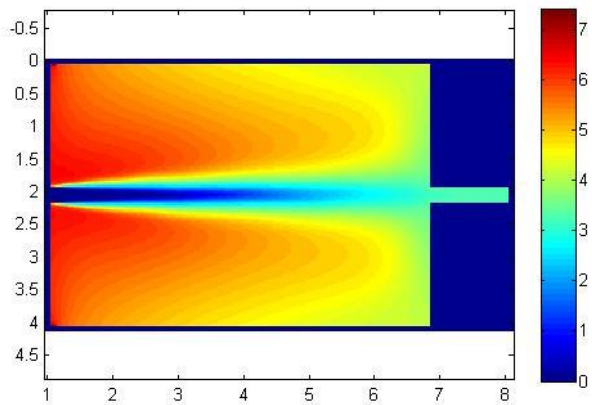
Rapport d'âge pour  $\alpha = 0.5$



Rapport d'âge pour  $\alpha = 1$



Rapport d'âge pour  $\alpha = 1,5$



Rapport d'âge pour  $\alpha = 10$

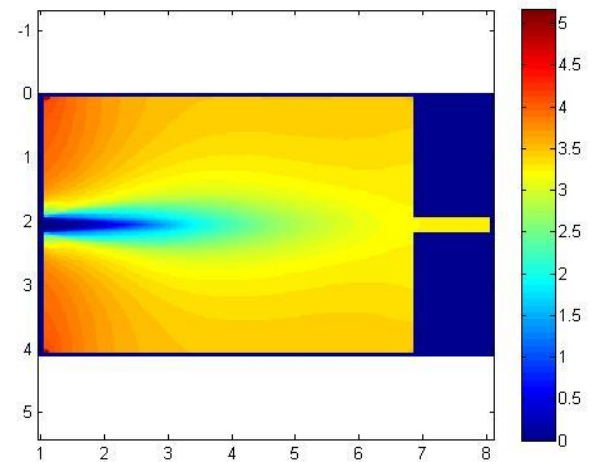


Figure 51 : Ensemble des patterns d'âge adimensionnel pour différents coefficients de diffusion

La diffusion tendant à homogénéiser le fluide voit une nouvelle fois le pattern de l'âge fois diminuer tout en s'accompagnant d'une augmentation de cette diffusion.

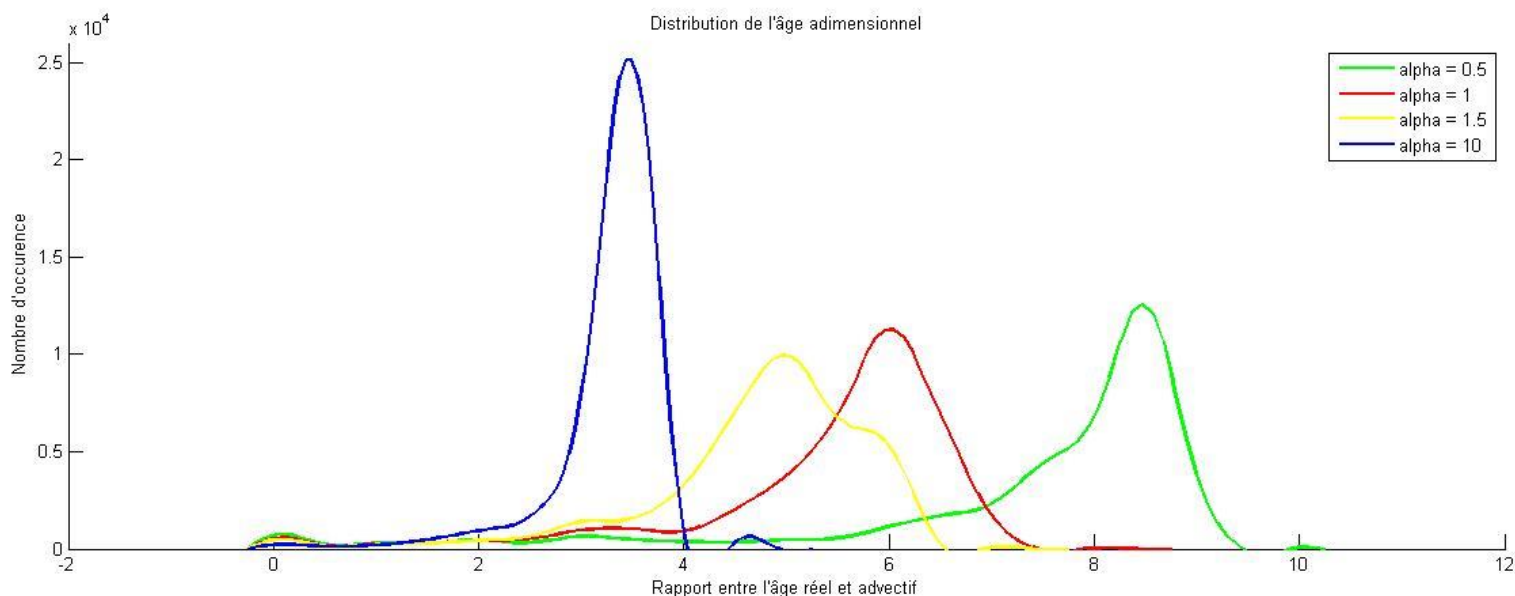


Figure 52 : Ensemble des patterns d'âge adimensionnel pour différents coefficients de diffusion

Le pattern de l'âge présente une seule partie distincte (voir figure 52). En effet, l'écoulement simplement dévié est ici quasiment rectiligne de par la symétrie des écoulements tourbillonnaires de part et d'autre de celui-ci (voir figure 53). Par ailleurs, la zone d'influence de l'écoulement rectiligne est spatialement très restreinte, la majeure partie des parcelles de fluides étant soumise à la recirculation tourbillonnaire et présentant un âge maximal réel huit fois plus important que l'âge advectif pour un alpha égal à l'unité.

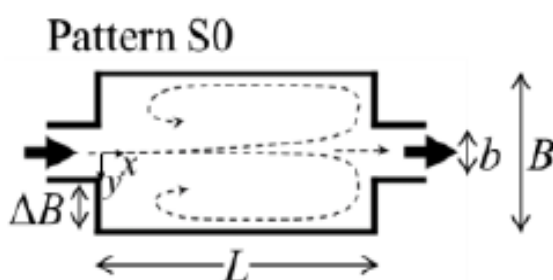
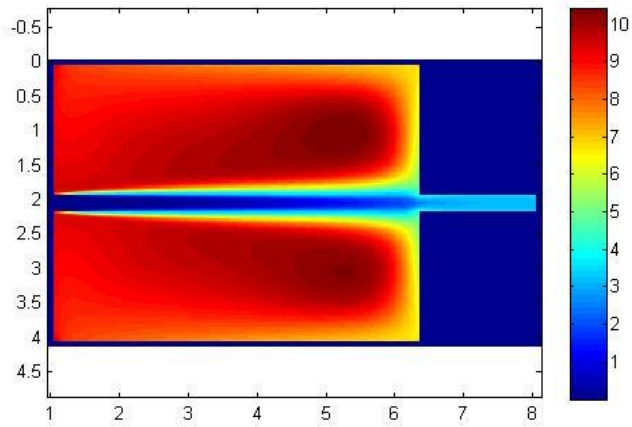


Figure 53 : Forme de l'écoulement type S0

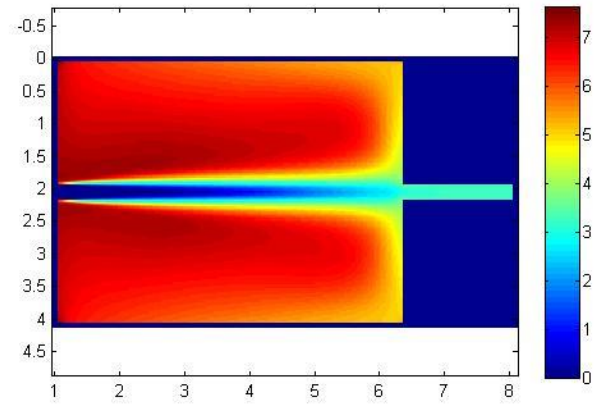
Ces constatations sont identiques aux configurations suivantes. Afin d'éviter une répétition inutile, ce rapport ne détaillera pas davantage les configurations suivantes à l'exception de la dernière (L300-B400) dont la largeur dépassant la longueur s'avère pertinente à commenter.

### 5.4.8 Configuration L530\_B400-Type S0

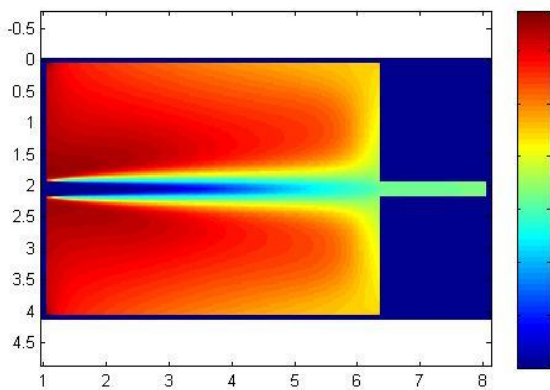
Rapport d'âge pour  $\alpha = 0.5$



Rapport d'âge pour  $\alpha = 1$



Rapport d'âge pour  $\alpha = 1,5$



Rapport d'âge pour  $\alpha = 10$

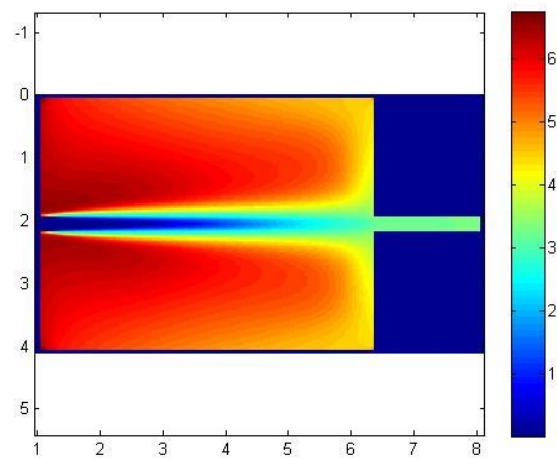


Figure 53 : Ensemble des patterns d'âge adimensionnel pour différents coefficients de diffusion

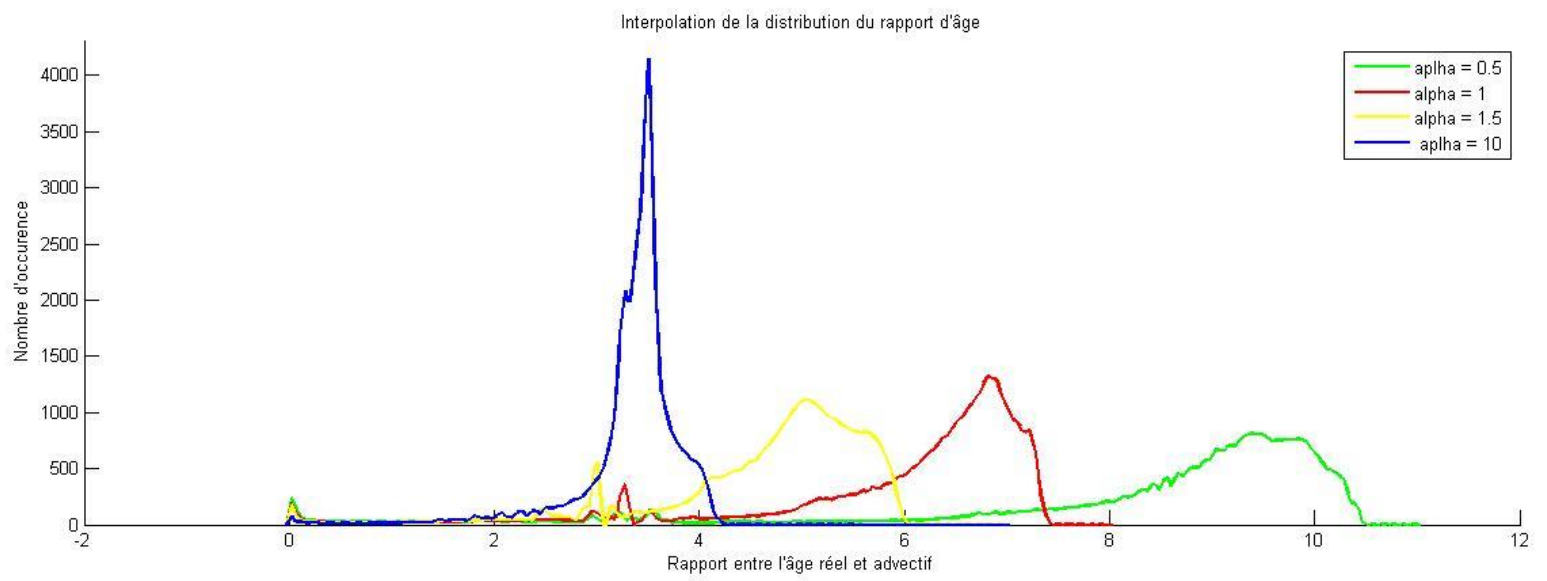
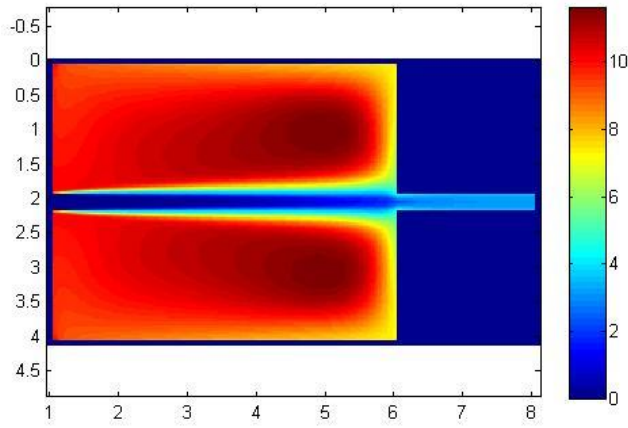


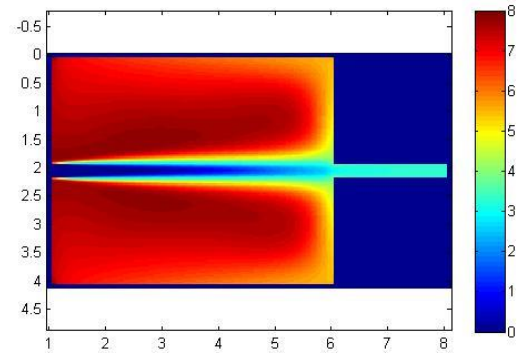
Figure 54 : Ensemble des patterns d'âge adimensionnel pour différents coefficients de diffusion

### 5.4.9 Configuration L500\_B400-Type S0

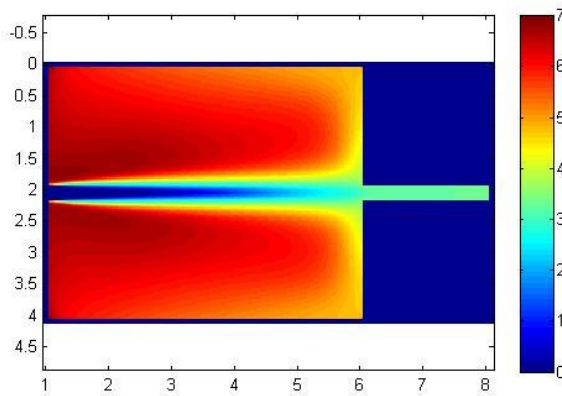
Rapport d'âge pour  $\alpha = 0.5$



Rapport d'âge pour  $\alpha = 1$



Rapport d'âge pour  $\alpha = 1,5$



Rapport d'âge pour  $\alpha = 10$

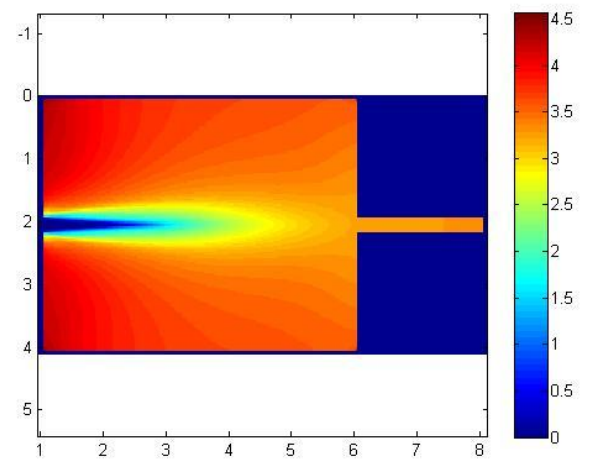


Figure 55 : Ensemble des patterns d'âge adimensionnel pour différents coefficients de diffusion

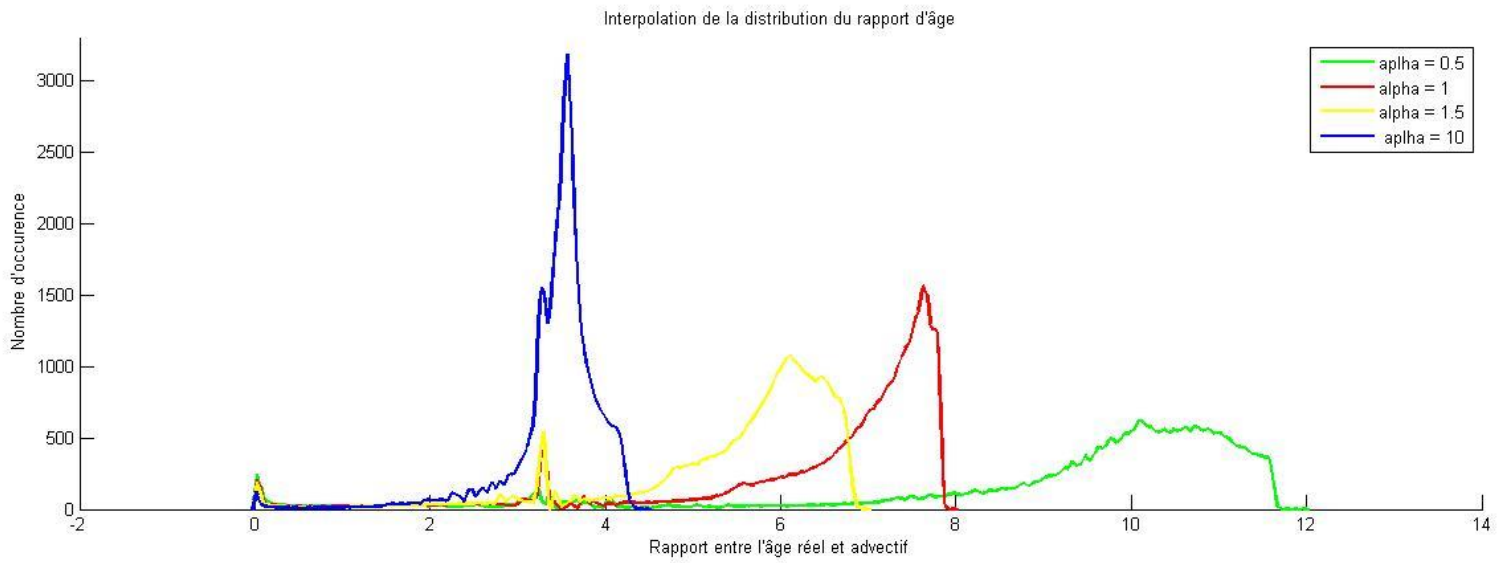
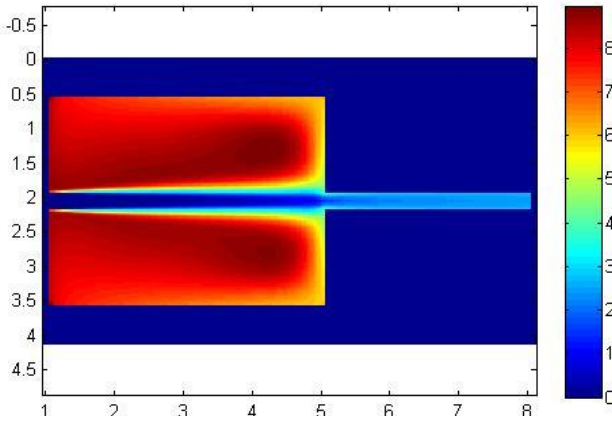


Figure 56 : Ensemble des patterns d'âge adimensionnel pour différents coefficients de diffusion

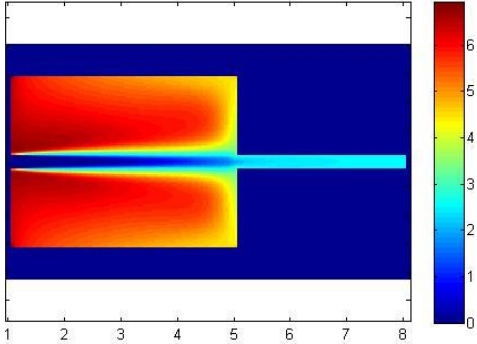
Il est à noter que les 3 précédentes configurations présentaient une longueur identique et que l'augmentation de la largeur du bassin engendre à chaque fois une augmentation du pattern de l'âge, constatation qui a fait l'objet du commentaire de la figure 30.

5.4.10 Configuration L400\_B300-Type S0

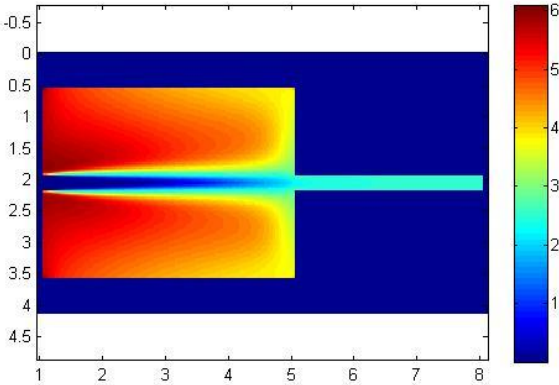
Rapport d'âge pour  $\alpha = 0.5$



Rapport d'âge pour  $\alpha = 1$



Rapport d'âge pour  $\alpha = 1,5$



Rapport d'âge pour  $\alpha = 10$

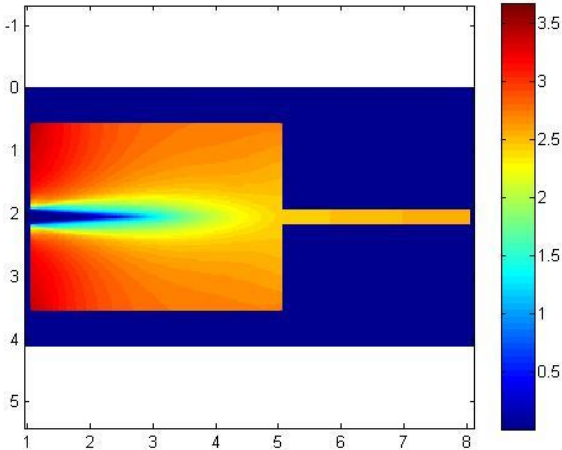


Figure 57 : Ensemble des patterns d'âge adimensionnel pour différents coefficients de diffusion

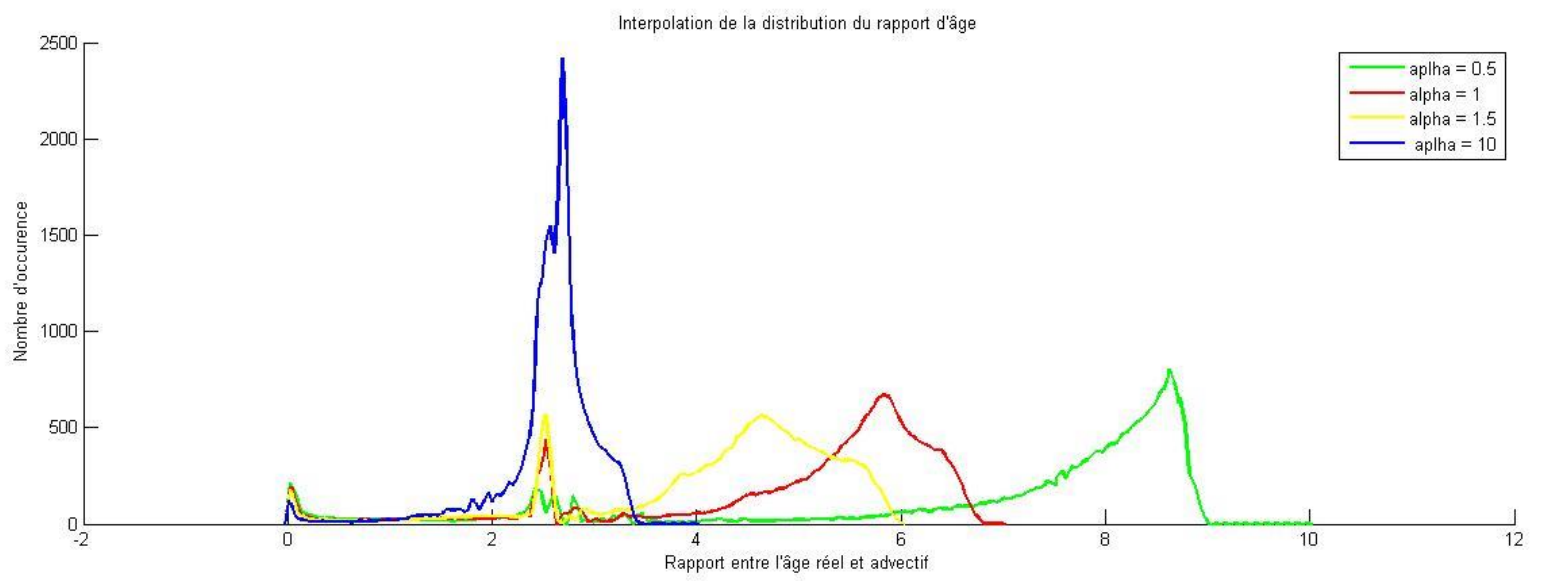


Figure 58 : Ensemble des patterns d'âge adimensionnel pour différents coefficients de diffusion

### 5.4.11 Configuration L300\_B400-Type S0

Figure 41 : Rapport d'âge pour  $\alpha = 0.5$

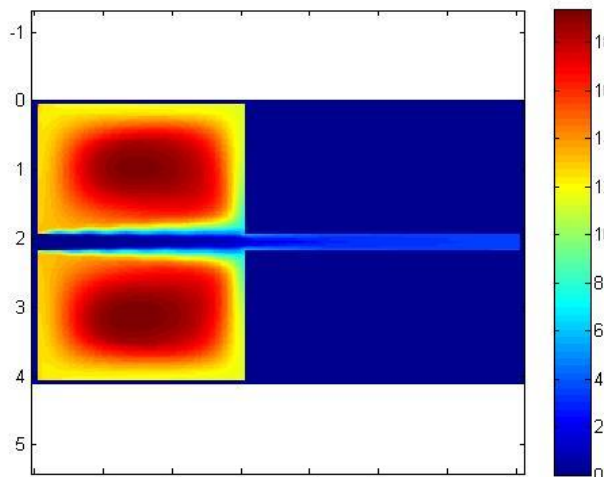


Figure 42 : Rapport d'âge pour  $\alpha = 1$

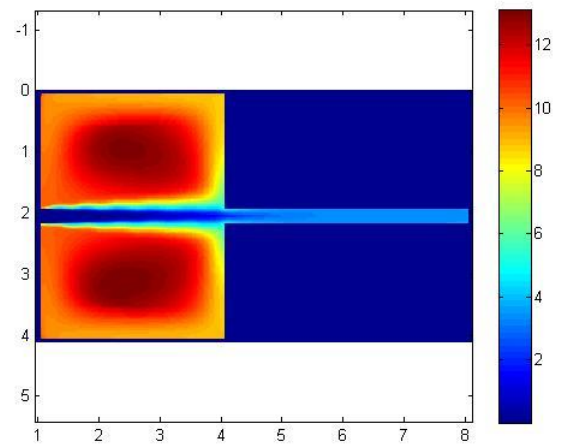


Figure 43 : Rapport d'âge pour  $\alpha = 1,5$

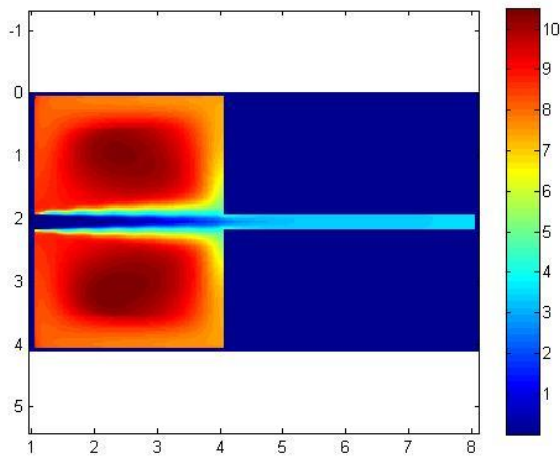


Figure 44 : Rapport d'âge pour  $\alpha = 10$

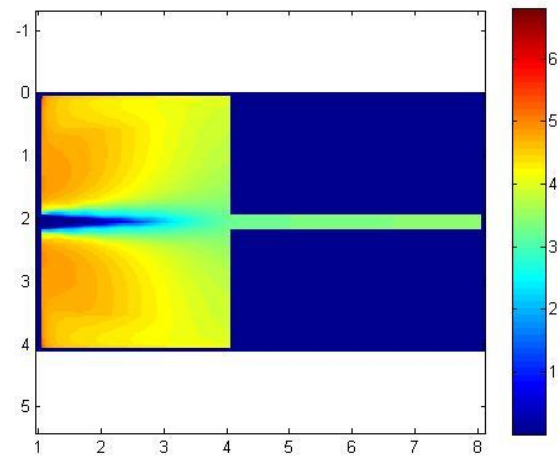


Figure 59 : Ensemble des patterns d'âge adimensionnel pour différents coefficients de diffusion

Le pattern de l'âge tend une nouvelle fois à être réduit avec une augmentation de la diffusion.

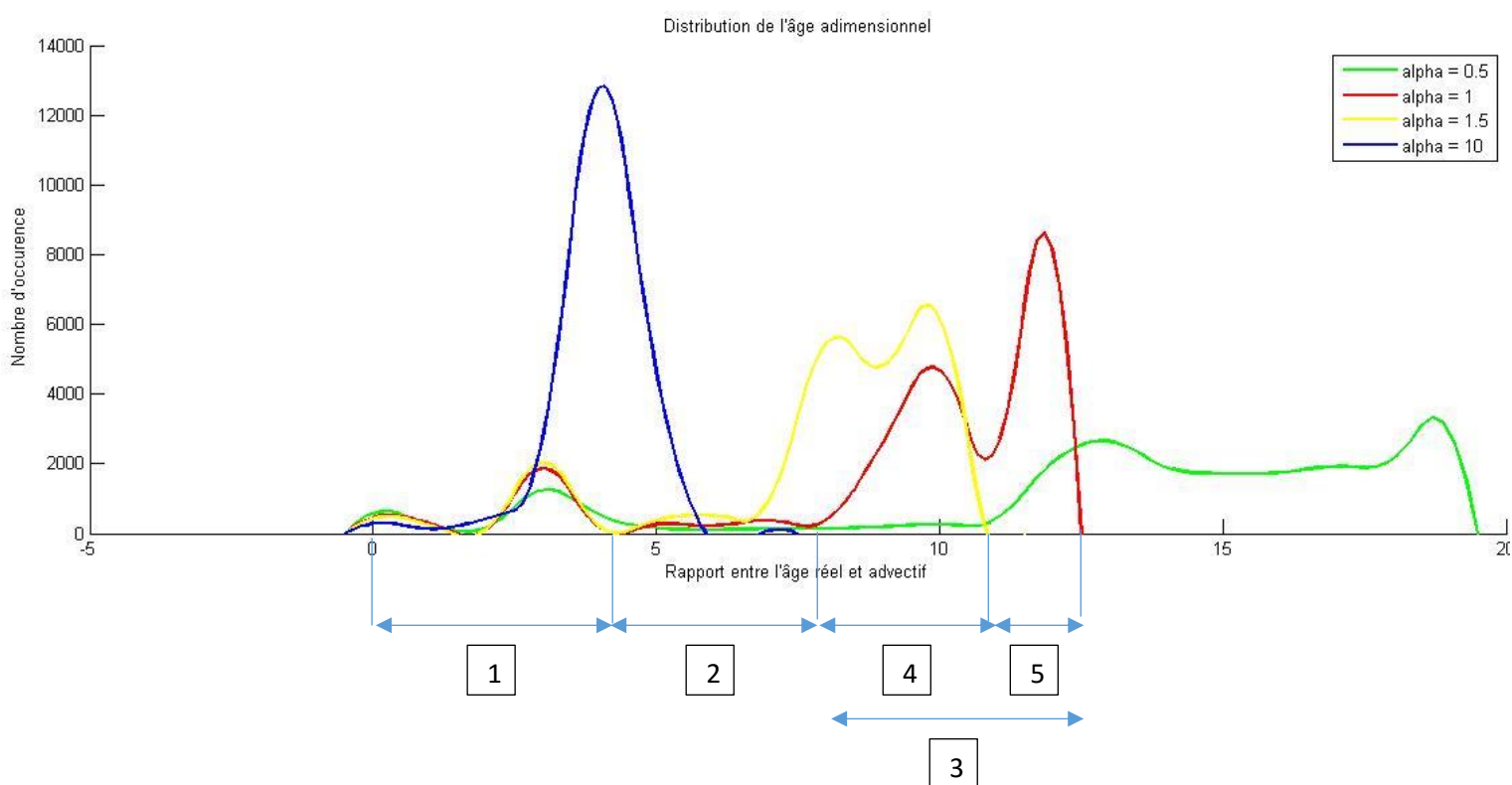


Figure 60 : Ensemble des patterns d'âge adimensionnel pour différents coefficients de diffusion

Ce bassin présente la géométrie unique d'avoir une largeur excédant sa longueur. La répercussion sur l'âge est importante puisque l'âge réel maximal calculé est de plus de 12 fois l'âge advectif. L'écoulement rectiligne présente également des fluctuations, cette observation ayant déjà été effectuée au cours des observations dans des travaux antérieurs.

La zone d'influence de l'écoulement rectiligne est spatialement et relativement plus grande que les configurations précédentes avec un même type d'écoulement.

La courbe en rouge ( $\alpha = 1$ ) permet de bien distinguer la gamme d'âge des particules soumis aux différents mouvements, en référence à la figure 60 ;

- 1) Gamme d'âge adimensionnel présent dans l'écoulement simplement dévié
- 2) Gamme d'âge adimensionnel présent à l'interface entre les deux écoulements
- 3) Gamme d'âge adimensionnel présent dans l'écoulement tourbillonnaire
- 4) Gamme d'âge adimensionnel présent en périphérie de l'écoulement tourbillonnaire
- 5) Gamme d'âge adimensionnel présent dans la partie centrale de l'écoulement tourbillonnaire

## 6. Pertinence et intérêts des résultats

### 6.1 Pertinence

Le calcul de l'âge au sein de telles configurations s'avère être un premier pas modeste vers la caractérisation par le temps de ces écoulements. En effet, le temps écoulé pour obtenir un écoulement stationnaire via l'écoulement transitoire n'a pas été déterminé. Nous pouvons émettre l'hypothèse que ce dernier sera proche du temps de séjour du fluide originel. De plus, un temps de sortie devra être également pris en compte par rapport à la « photographie » de l'écoulement à partir de laquelle a été calculé l'âge réel. Prenons par exemple des vortex présents dans l'écoulement stationnaire du bassin L600-B400 comme présenté à la figure 61 :

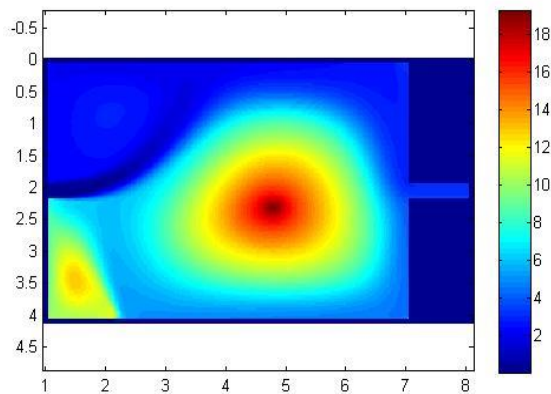


Figure 61 : pattern d'âge adimensionnel pour  $\alpha = 1$ , configuration : L600-B400

Les résultats numériques indiquent que les parcelles de fluides présentes au centre du vortex auront un âge proche de 18 fois l'âge advectif, c'est-à-dire d'environ 3 852 secondes. L'âge réel final étant le moment où la parcelle de fluide en question franchit la sortie, c'est à ce moment-là que le « chronomètre virtuel » fixé à la parcelle de fluide s'arrête. Ces dernières étant toujours dans le bassin, nous pouvons assurer que l'âge final d'une parcelle de fluide sera plus grand que l'âge calculé dans les chapitres précédents.

Comme mentionné précédemment, le logiciel Wolf - à travers son modèle  $k-\varepsilon$  - a fourni des résultats proches des essais expérimentaux pour différents paramètres tels que l'énergie cinétique mesurée dans les bassins, dépassant ainsi en précision les modèles analytiques. Bien que le paramètre étudié soit différent, nous pouvons avoir une certaine confiance quant à la véracité des résultats précédents. L'étude de la stabilité de la solution sera mentionnée dans la suite de ce travail.

Cette estimation de l'âge peut, en fonction de la position des parcelles de fluides, s'avérer être un élément déterminant dans le choix d'une géométrie de bassins réfléchi quant à la décantation/sédimentation. La sédimentation - ou décantation - regroupe l'ensemble des phénomènes qui conduit à la formation et au dépôt de particules en suspension sous l'action de la pesanteur. C'est ce phénomène qui va permettre de clarifier de l'eau en la laissant séjourner dans un bassin.

Les mécanismes qui régissent ce phénomène sont complexes. En effet, l'interaction entre les particules est difficile à appréhender et intervient de manière importante puisque plus les particules s'agglomèrent, plus la sédimentation est facilitée. Dans notre cas, le phénomène de sédimentation va s'opérer et permettre la diminution des matières en suspension dans l'eau. La quantité des éléments transportés dépend des caractéristiques du fluide, vitesse et viscosité, et de celles des particules elles-mêmes, taille, forme, densité. Ainsi, une particule en chute libre est soumise à la gravité, à la poussée d'Archimède et à la force de traînée. Lorsque l'équilibre de ces forces est atteint, la vitesse limite de la particule est la vitesse de sédimentation  $W_s$ . On l'exprime de la manière suivante :

$$W_s = \frac{(s - 1)gd^2}{18\nu} \quad (42)$$

Pour que la décantation puisse se faire correctement, il faut que la vitesse de l'eau soit inférieure à la vitesse de Sédimentation des particules ( $W_s$ ). La vitesse de l'eau est appelée charge hydraulique superficielle ou vitesse de Hazen ( $V_H$ ) et permet de dimensionner les décanteurs.

$w_s$  : Vitesse de sédimentation ( $\frac{m}{s}$ )

$s = \frac{\rho_s}{\rho_w}$  : Densité relative

$\rho$  : masse volumique ( $\frac{kg}{m^3}$ )

$g$  : gravité ( $9.81m/s^2$ )

$d$  = diamètre de la particule ( m )

$\nu$  = viscosité cinématique ( $m^2/s$ )

- Lorsque la vitesse de sédimentation des particules ( $W_s$ ) est inférieure à la vitesse de Hazen ( $V_H$ ), les particules ne sont pas sédimentées et partent avec l'eau vers le filtre.
- Lorsque la vitesse de sédimentation des particules ( $W_s$ ) est supérieure à la vitesse de Hazen ( $V_H$ ), les particules sont piégées par le décanteur et s'accumulent au fond du bassin.

Il est à noter que pour que le décanteur soit efficace, les écoulements dans les bassins doivent présenter des nombres de Reynolds relativement faibles, ce qui implique que la turbulence au sein de ces écoulements soit négligeable. La turbulence engendre en effet le charriage des particules déposées au fond du bassin. L'hypothèse d'un écoulement laminaire permet de ne tenir compte que des particules en suspension.

Il existe deux types de décanteurs : les décanteurs lamellaires et les décanteurs horizontaux tels que présentés respectivement sur la figure 62 et la figure 63.

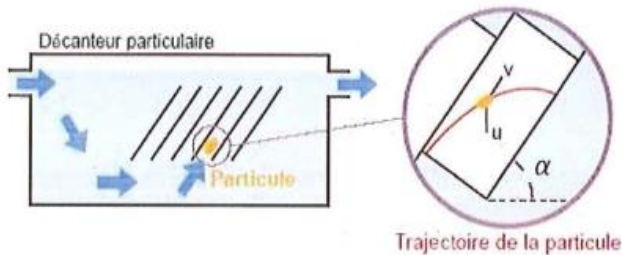


Figure 62 : Décanteur particulaire



Figure 63 : Décanteur horizontal

Intéressons-nous au décanteur horizontal : celui-ci est généralement constitué d'une cuve parallélépipédique telle que les bassins dans lesquels se déroule cette étude. L'eau chargée de sédiments pénètre à une extrémité et l'eau décantée ressort à l'autre, suivant un écoulement horizontal. Le principe de la décantation à flux horizontal est représenté de manière simplifiée par le modèle de Hazen illustré par la figure 64 ci-dessous.

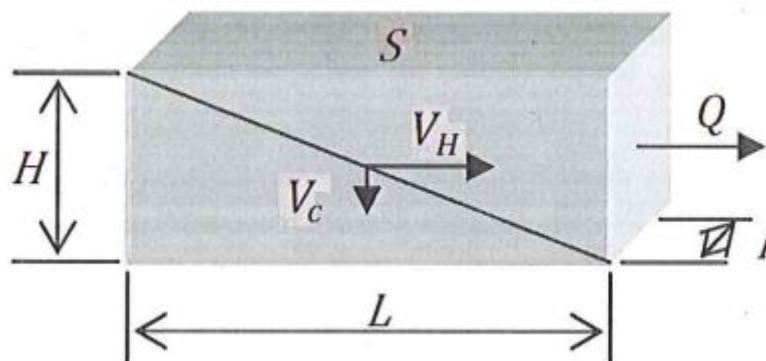


Figure 64 : Schéma d'un décanteur horizontal (théorie de Hazen)

Selon ce modèle, une particule de vitesse de chute  $V_c$  (ou encore  $W_s$ ) décantant sur une hauteur  $H$  est retenue dans un bassin de longueur  $L$  et de surface horizontale  $S$ , traversé par un débit  $Q$  si :  $V_c \geq V_h$ , avec  $V_h$  (vitesse de Hazen) =  $Q/S$ .

En théorie, l'efficacité d'un décanteur horizontal ne dépend que de sa vitesse de Hazen et non de sa hauteur ou de son temps de rétention. Cependant, les particules contenues dans l'eau floculée entrant dans le décanteur présentent toute une gamme de dimensions. Au cours de leur parcours dans l'ouvrage, les plus petites peuvent s'agglutiner entre elles : c'est le phénomène de coalescence. Leur taille, et donc leur vitesse de sédimentation, augmentent avec le temps. La trajectoire devient de ce fait curviligne. Par conséquent, l'efficacité de la décantation dépend aussi du temps de rétention. Le temps que prend une parcelle de fluide pour sortir du bassin depuis son entrée est donc un élément de premier ordre en ce qui concerne la décantation.

## 6.2 Intérêts

Cette sous-section présente des pistes de réflexions quant à l'intérêt du calcul de l'âge dans le contexte de bassin de sédimentation. La prise en compte de la sédimentation dans le calcul de l'âge s'avère complexe, raison pour laquelle une étude spécifique pourrait lui être consacrée dans la continuité logique de ce mémoire. En effet, la sédimentation va perturber de manière relativement faible l'écoulement (voir figure 65) ou aura, dans d'autres configurations, un impact suffisamment élevé qui pourrait perturber l'écoulement (voir figure 66).

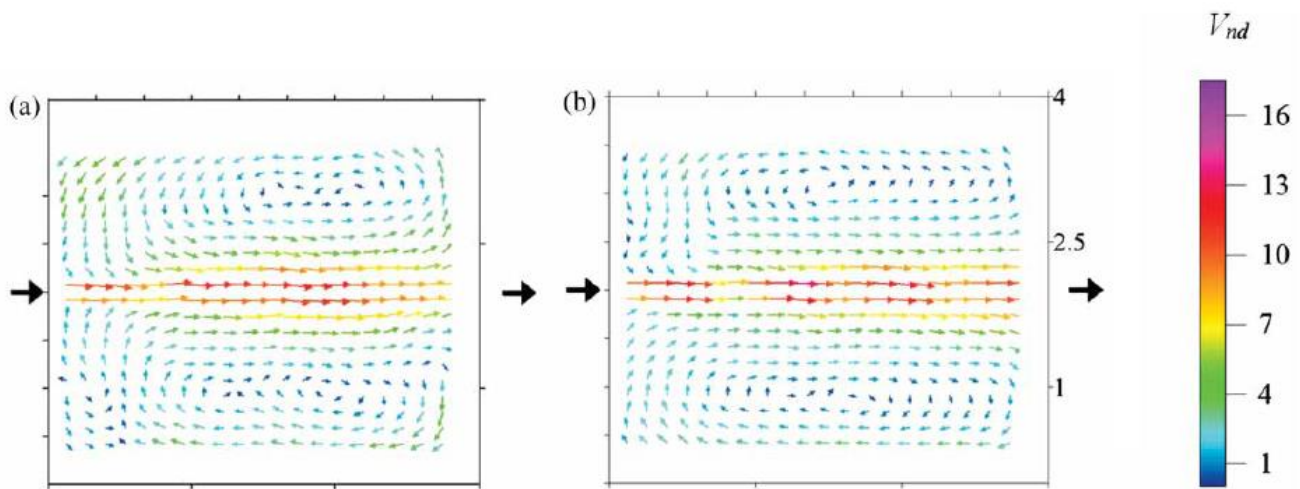


Figure 65 : Patterns de la vitesse adimensionnel pour : (a) sans sédiment et (b) avec sédiments

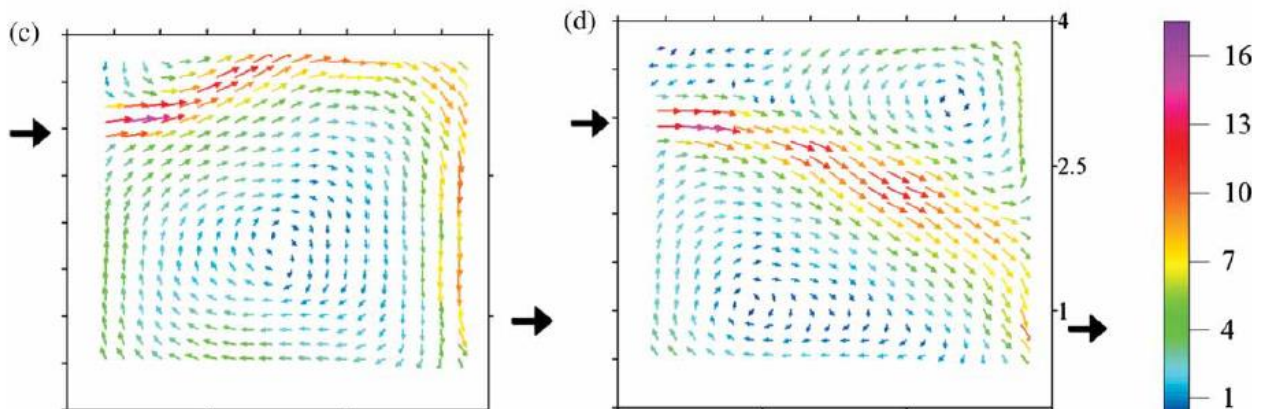


Figure 66 : Pattern de la vitesse adimensionnel dans une même configuration pour : (c) Sans sédiment et (d) Avec sédiments

Après un certain laps de temps, nous pouvons observer des zones de dépôts de sédiments plus importantes (voir figure 67) se situant au même endroit que l'écoulement simplement dévié. L'âge des particules étant relativement faible à cet endroit, ces jeunes parcelles de fluides sont par conséquent encore fortement chargées en sédiments.

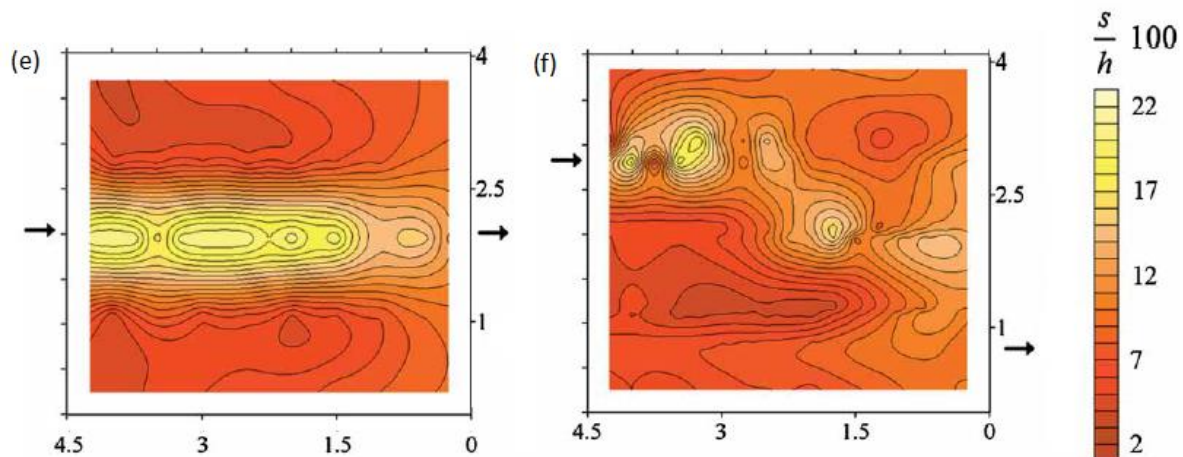


Figure 67 : Épaisseur du dépôt de sédiment normalisé en respect de la hauteur d'eau présente pour deux configurations différentes.

Ces zones de dépôts entravent l'efficacité du bassin, soulignant ainsi une nouvelle fois la pertinence d'une sédimentation réfléchie et la nécessité d'effectuer des entretiens réguliers.

Une réflexion intéressante serait d'estimer, par rapport aux configurations étudiées dans ce rapport, quel bassin serait le plus adéquat pour une sédimentation réfléchie selon le pattern de l'âge observé. Dans un premier temps, d'après la figure 63, il serait tentant de citer le bassin L600\_B060 (voir figure 68) car les parcelles de fluides à la sortie présentent l'âge le plus élevé, ce qui signifie par conséquent qu'elles s'avèrent plus aptes à se débarrasser des sédiments qu'elles contiennent.

Malgré tout, ce type de configuration, d'un point de vue de « zone de dépôt », pourrait poser problème. En effet, les jeunes particules se trouvent dans une zone spatialement importante à proximité de l'entrée, signifiant que le dépôt se fera à cet endroit et entravera rapidement l'entrée.

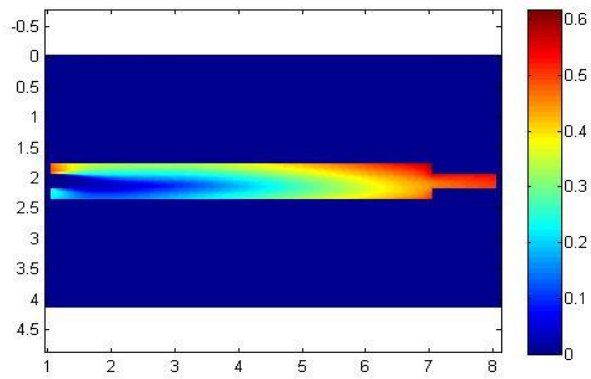


Figure 68 : Pattern de l'âge adimensionnel dans la configuration L600\_B060

Il faudrait alors trouver une configuration optimale selon laquelle les parcelles de fluides auraient un âge homogène adéquat à la sortie avec des zones de dépôt de sédiments réparties de manière optimale. Une idée intéressante serait d'observer la variation des zones de sédimentation pour un bassin changeant de configuration en fonction de l'emplacement de l'entrée et de la sortie (voir figure 69).

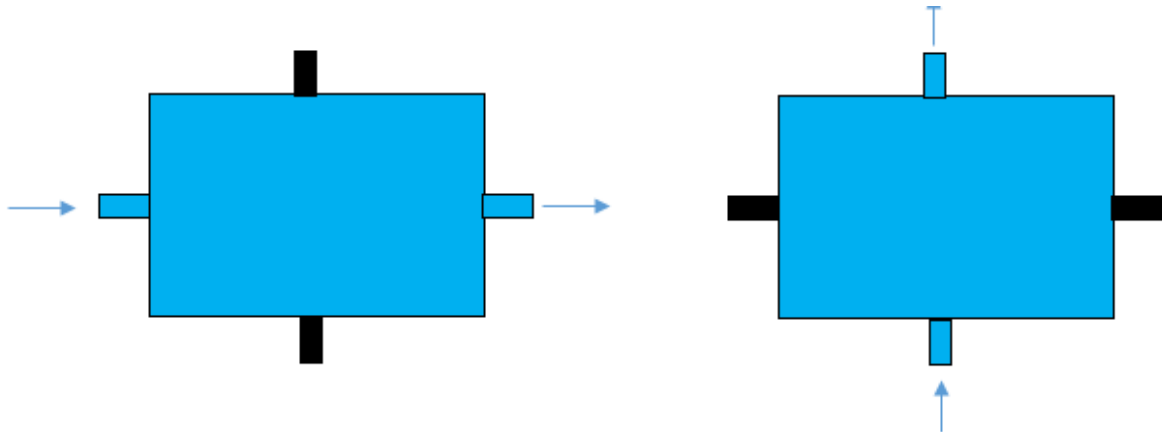


Figure 69 : Illustration d'une seule configuration variable en fonction de l'entrée et de la sortie

Le pattern de l'âge estimé dans les configurations L400\_B300 et L300\_B400 pourrait alors nous fournir une première visualisation des phénomènes se déroulant dans une configuration variable telle qu'illustrée à la figure 70 en référence à la figure 69.

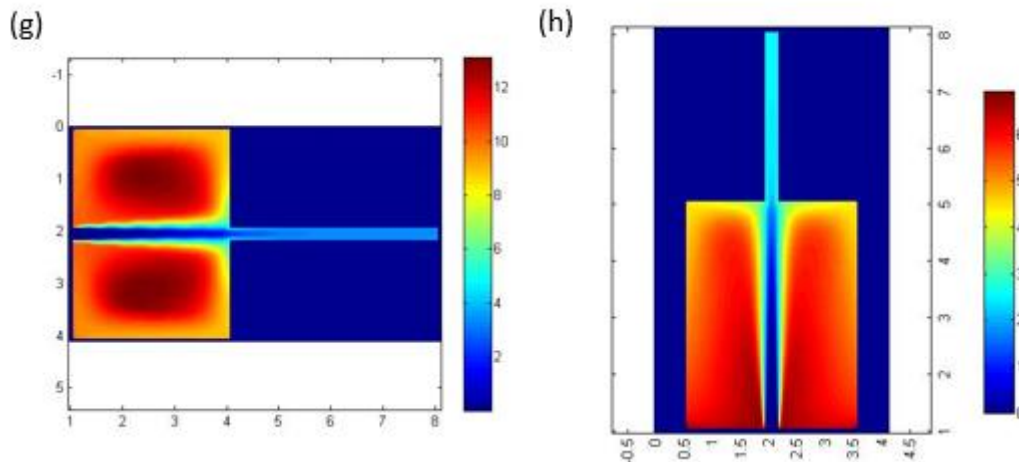


Figure 70 : Pattern de l'âge adimensionnel dans une configuration : (g) B400\_L300 et (h) L400\_B300

Imaginons que l'âge réel des parcelles de fluides à la sortie soit adapté à un certain temps de sédimentation souhaité.

Configurations	Estimation de l'âge adimensionnel à la sortie [/]	Age advectif [s]	Age réel à la sortie [s]
<b>L300-B400 (g)</b>	<b>3,5</b>	<b>106.91</b>	<b>374</b>
<b>L400-B300 (h)</b>	<b>2</b>	<b>142.35</b>	<b>284.7</b>

La configuration présentant l'âge réel le plus faible à la sortie serait alors le temps de référence par rapport à la sédimentation souhaitée. Dans les cas qui nous occupent, il s'agit de la configuration L400-B300. L'alternance des positions d'entrée et de sortie pourrait alors procurer les avantages suivants :

- Si le temps de sédimentation est inférieur à l'âge réel des parcelles de fluides présentes à la sortie, chaque parcelle aura alors eu le temps de relâcher les particules indésirables, et ce dans les deux configurations.
- La zone de dépôt pour ce type d'écoulement est concentrée à proximité de l'axe joignant l'entrée et la sortie. Les zones de dépôt seront donc perpendiculaires d'une configuration à l'autre.
- Les zones étant proches de la sortie suivante présentent des âges relativement élevés, ce qui signifie que l'écoulement de transition fournira en toute logique des parcelles de fluide ayant un âge élevé à la sortie.
- Le changement de recirculation devrait contribuer à une meilleure répartition des dépôts dans le bassin, entravant de manière moins accentuée l'écoulement.

## 7. Piste d'amélioration

Une piste d'amélioration de cette étude pouvant s'avérer pertinente serait la comparaison plus en profondeur entre le pattern d'âge adimensionnel observé et le pattern de vitesse adimensionnel.

En effet, les vitesses d'entrée et de sortie étant semblables, nous pourrions définir une vitesse de référence de manière similaire à l'âge advectif. Il faudrait alors diviser l'ensemble des vitesses par cette vitesse advective. La zone de l'écoulement simplement dévié décrit précédemment devrait alors présenter une vitesse adimensionnelle proche de 1, puisque celui-ci relie l'entrée et la sortie (ayant une vitesse égale à la vitesse advective).

Cette vitesse adimensionnelle permettrait dans un premier temps d'observer le rapport entre les vitesses des parcelles de fluides présentes dans l'écoulement simplement dévié avec celles soumises au mouvement tourbillonnaire, ainsi qu'à l'interface entre les deux mouvements.

Dans un second temps, une corrélation entre l'âge advectif et la vitesse advective pourrait alors être effectué. Il pourrait être supposé que des parcelles de fluides en fonction de leur vitesse advective puissent sortir du mouvement tourbillonnaire pour rejoindre le mouvement simplement dévié ou non, et ceci s'observerait par rapport au pattern de l'âge adimensionnel.

Cette analyse est un manquement dans le présent mémoire, qui apporte parfois une interprétation des résultats obtenus de façon un peu trop « simpliste », avec uniquement une observation visuelle. Cette piste d'amélioration pourrait apporter un plus à l'analyse, sans perdre de vue un des buts premiers de ce rapport qui est d'apporter une vision différente de l'écoulement en comparaison d'études basées sur des variables primitives.

Cette réflexion demandait un travail supplémentaire que je n'ai malheureusement pas eu le temps d'effectuer. Toutefois, ce complément d'informations peut être relativement facile à étudier via l'ensemble des résultats recueillis dans cette étude. Ces informations peuvent être consultés via une clé usb Wafer joint à ce document texte. Une note explicative se trouve dans en début de dossier et permet ainsi la bonne continuité dans ce domaine d'étude.

## 8. Conclusion

L'objectif était d'obtenir une caractérisation de l'écoulement via l'échelle de temps développée par la théorie de l'âge. À vrai dire, l'estimation des résultats attendus est complexe dans la mesure où peu d'études se sont penchées sur le sujet de cette façon. Il s'avère en outre compliqué d'estimer le temps passé à partir de l'entrée d'une parcelle de fluide dans le bassin jusqu'à un moment observé, raison pour laquelle il a été décidé de diviser l'âge réel des parcelles de fluides selon l'âge advectif.

En effet, si on demande à une personne lambda d'estimer le temps que prendra une parcelle de fluide pour parcourir le bassin de l'entrée à la sortie, une personne peu avertie estimera, en ayant connaissance du débit d'entrée et de la géométrie du bassin, une approximation rapide du temps de « passage » dans le bassin. Or, la présente étude démontre que cette approximation est erronée pour la majeure partie des parcelles de fluides, certains résultats pouvant atteindre jusqu'à 12 fois cette rapide approximation.

Par ailleurs, les âges calculés des parcelles de fluides permettent désormais de quantifier cette valeur en tout point du bassin en ce qui concerne l'écoulement permanent. Puisque l'étude porte sur l'écoulement permanent, nous pouvons certifier que les parcelles de fluides auront un âge final d'au moins celui calculé.

Les différentes hypothèses amenant à ces résultats ont été clairement décrites, en particulier celles portant sur l'implémentation de la diffusion et des conditions limites.

La comparaison entre les patterns d'âge découlant de cette étude et les patterns d'écoulement déduits par des travaux antérieurs conforte notre réflexion sur la véracité des résultats et peut y apporter, de par sa vision atypique de l'écoulement, des informations supplémentaires.

Certains manquements peuvent éventuellement se faire sentir quant à la prise en compte des éléments autres que de l'eau pure. La prise en compte de différents constituants dans la parcelle de fluide n'a été mentionnée que de manière théorique, le calcul de l'interaction et du mouvement de ces constituants s'avérant être d'un niveau de complexité encore plus important, dans un domaine où des bases de réflexions ne sont en outre pas encore légions.

Ce mémoire est donc un premier pas vers une caractérisation complète de l'écoulement via une échelle de temps. Il faudra toutefois également prendre en compte, d'une part la situation transitoire menant à l'écoulement permanent et d'autre part, une situation où les parcelles de fluides soumises au mouvement tourbillonnaire parviendront malgré tout à rejoindre la sortie. Effectivement, la présence de diffusion indiquerait qu'une parcelle de fluide ne peut rester indéfiniment à l'intérieur du bassin. Ces points d'attentions pourraient s'avérer être des questionnements de départ en ce qui concerne la continuité de l'interprétation de l'écoulement selon la théorie de l'âge en tenant compte les différentes réflexions et résultats exposés dans ce mémoire.

## 9. Références

Gérald OUVRADOU. Mise à jour le 11 /03/2011 « *Fiche technique 1 : Les bassins de rétention* »

Site web : <http://www.vplouzane.infini.fr/spip.php?article58&lang=fr>

Dernière consultation le 05/07/2017.

AECI/BALME Forage. Mise à jour le 13/09/2009 « *Bassins : rétention et stockage d'eau, défense incendie* »

Site web : <http://assainissement-eaux.fr/recuperation-eau-de-pluie/bassins-de-retention>

Dernière consultation le 05/07/2017.

PBE - Picardie Bâches Etanchéité. Mise à jour le 02/02/2017 « *La maîtrise des fluides* »

Site web : <http://www.pbaches.com/geomembranes-baches-pour-bassins>

Dernière consultation le 05/07/2017

Mikael GUILLOU, mai 2013. Mise à jour le 03/07/2017 « *Bassin de stockage d'eau et de sédimentation : Concept et dimensionnement* »

Site web : <http://www.bape.gouv.qc.ca/>

Dernière consultation le 05/07/2017

Captiven. Mise à jour le 04/06/2015 « *Suivi et analyse des échanges entre bassin de décantation et nappes environnantes* »

Site web : <http://www.captiven.fr/article/suivi-et-analyse-des-%C3%A9changes-entre-bassin-de-d%C3%A9cantation-et-nappes-environnantes>

Dernière consultation le 05/07/2017

Eric DELEERSNIJDER, Eric J.M. DELHEZ and Anne MOUCHET, 2016. « *CART: the Constituent-oriented Age and Residence time Theory* »

Site web : [https://perso.uclouvain.be/eric.deleersnijder/CART\\_Flyer.pdf](https://perso.uclouvain.be/eric.deleersnijder/CART_Flyer.pdf)

Dernière consultation le 05/07/2017

B.J. DEWALS, · S.A. KANTOUSH, · S. ERPICUM, M. PIROTON and · A.J. SCHLEISS, 2016. « *Experimental and numerical analysis of flow instabilities in rectangular shallow basins* »

Publié dans : < Environmental Fluid Mechanics (2008), vol. 8, pp. 31-54 >

Site web : <https://orbi.ulg.ac.be/bitstream/2268/1799/2/B163B024.pdf>

Dernière consultation le 05/07/2017

Matthieu DUFRESNE, 2008. « *Criteria for predicting asymmetric and symmetric flows in rectangular detention tanks* »

Site web :

[https://web.sbe.hw.ac.uk/staffprofiles/bdgsa/11th\\_International\\_Conference\\_on\\_Urban\\_Drainage\\_CD/ICUD08/pdfs/687.pdf](https://web.sbe.hw.ac.uk/staffprofiles/bdgsa/11th_International_Conference_on_Urban_Drainage_CD/ICUD08/pdfs/687.pdf)

Dernière consultation le 05/07/2017

Eric DELEERSNIJDER, Jean-Michel CAMPIN, Eric J.M. DELHEZ, 2001. « *The concept of age in marine modelling: I. Theory and preliminary model results* »

Publié dans : < Journal of Marine Systems, Volume 28 , Issues 3–4, April 2001, Pages 229-267 >

Anne MOUCHET, · Fabien CORNATON, · Eric DELEERSNIJDER, · Eric J. M. DELHEZ, 2016. « *Partial ages: diagnosing transport processes by means of multiple clocks* »  
Publié dans : <Ocean Dynamics (2016) 66:367–386>

Benjamin de BRYE, Anouk de BRAUWERE, Olivier GOURGUE, Eric J.M. DELHEZ and Eric DELEERSNIJDER, 2011. « *Water renewal timescales in the Scheldt Estuary* »  
Publié dans : <Journal of Marine Systems 94 (2012) 74–86>

J.M. BECKERS, 2004. « *Mécanique des fluides géophysiques - version préliminaire, page 31* »  
Site web : <http://modb.oce.ulg.ac.be/cours/MECA053/meca0053-1notes.pdf>  
Dernière consultation le 05/07/2017

J. ROUSSEL, 2010. « *Écoulements stationnaires. FEMTO, la physique enseignée* »  
Site web : [http://femto-physique.fr/mecanique\\_des\\_fluides/mecaflu\\_C1.php](http://femto-physique.fr/mecanique_des_fluides/mecaflu_C1.php)  
Dernière consultation le 05/07/2017

Olivier LOUISNARD, 2012. « *Cours de mécanique des fluides* »  
Site web : <http://perso.mines-albi.fr/~louisnar/MECADEF/PolyMecaDef.pdf>  
Dernière consultation le 05/07/2017

J.L. ESTIVALEZES, 2006. « *Note de cours, page 16-20* »  
Site web : [http://hmf.enseiht.fr/coursenligne/estivalezes/notes\\_tmms.pdf](http://hmf.enseiht.fr/coursenligne/estivalezes/notes_tmms.pdf)  
Dernière consultation le 05/07/2017

Daniel HUILIER, IMFS Equipe Instabilités-Turbulence-Diphasique, Sd. « *Vitesse de Sédimentation particulière* »  
Site web : <http://www.daniel-huilier.fr>  
Dernière consultation le 05/07/2017

GuidEnR HQE, Sd. « *Techniques classiques de dépollution des eaux pluviales- Les décanteurs* »  
Site web : <http://www.guidenr.fr/>  
Dernière consultation le 05/07/2017

Bei ERE, 2011. « *Sédimentation dans le bassin* »  
Site web : <http://hmf.enseiht.fr/travaux/CD1011/bei/beiere/groupe5/node/123>  
Dernière consultation le 05/07/2017

Erica CAMNSASIO et al., 2013. « *Coupling between flow and sediment deposition in rectangular shallow reservoirs* »  
Publié dans : <Journal of Hydraulic Research Vol. 51, No. 5 (2013), pp. 535–547>

Matthieu DUFRESNE et al., 2010. « *Classification of flow patterns in rectangular shallow reservoirs* »  
Publié dans : <Journal of Hydraulic Research Vol. 48, No. 2 (2010), pp. 197–204>

Erica CAMNSASIO, Sébastien ERPICUM, Pierre ARCHAMBEAU, Michel PIROTON, Benjamin DEWALS, 2014. « *Prediction of mean and turbulent kinetic energy in rectangular shallow reservoirs* »  
Publié dans : <Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics Vol. 8, No. 4, pp. 586-597 (2014) >

Jun Mei ZHANG, Heow Pueh LEE, Boo Cheong KHOO, Kai Qi PENG, Liang ZHONG, Chang-Wei KANG, and Te BA, 2014. « *Shape effect on mixing and age distributions in service reservoirs* »  
Site web : <<https://www.awwa.org/publications/journal-awwa/abstract/articleid/47434509.aspx>>  
Dernière consultation le : 05/07/2017

Y. PELTIER, S. ERPICUM, P. ARCHAMBEAU, M. PIROTON, B. DEWALS, 2014. « *Meandering jets in shallow rectangular reservoirs: POD analysis and identification of coherent structures* »  
Référence : <Exp Fluids (2014) 55:1740- DOI 10.1007/s00348-014-1740-6>

E. DELEERSNIJDER, 2017. « A propos des conditions aux limites employées dans l'étude de ventilation de Bendtsen et al. (JMS, 2009) »  
Référence : <Deleesnijder 2017 – Dial – Working paper>

Ch. MERCIER, E.J.M. DELHEZ, 2010. « *Consistent computation of the age of water parcels using CART* »  
Publié dans : < Elsevier : Ocean modelling 35 (2010), 67-76>

Benjamin de BRYE, Anouk de BRAUWERE, Olivier GOURGUE, Eric J.M. DELHEZ, Eric DELEERSNIJDER, 2011. «Water renewal timescales in the Scheldt Estuary »  
Publié dans : < Elsevier : Journal of Marine Systems 94 (2012), 74-86>

