

Influence du mode de pulvérisation des gouttes sur l'atténuation du rayonnement par un brouillard d'eau.

Anthony COLLIN¹, Sullivan LECHENE², Gilles PARENT², Pascal BOULET^{2*}

¹Nancy Université, LEMTA - UMR 7563 / Equipe Feux de Forêts
2 avenue de la Forêt de Haye, BP 160
54504 Vandoeuvre cedex

²LEMTA - UMR 7563 / Equipe Transfert Radiatif
Faculté des Sciences et Techniques, BP 239
54506 Vandoeuvre cedex

* (auteur correspondant : pascal.boulet@lemta.uhp-nancy.fr)

Résumé - Nous avons utilisé notre code de simulation du rayonnement transmis à travers un brouillard d'eau pour comparer l'atténuation de rayonnement dans l'infrarouge obtenue à partir de plusieurs stratégies de pulvérisation. Nous avons en particulier testé différentes associations de tuyères et différentes possibilités de pulvérisations, ascendante et descendante. Le temps de résidence des gouttes apparaît comme un paramètre crucial, à associer à la taille et à la concentration des gouttes pour envisager l'optimisation des brouillards d'eau.

1. Introduction

Les brouillards constitués de gouttelettes d'eau en suspension dans l'air ont la capacité d'atténuer le rayonnement des flammes par effet combiné d'absorption et de diffusion (le rayonnement est « dévié » de sa direction d'origine par les gouttelettes). S'il n'est pas possible de proposer une synthèse bibliographique complète sur ce sujet compte tenu des travaux nombreux entrepris ces dix dernières années notamment, on peut au moins faire référence aux travaux récents réalisés dans le cadre de la thématique incendie. Outre dans notre équipe ceux de Collin et al. [1], on trouvera des progrès récents en France dans les travaux de Nmira [2], ou au-delà dans ceux de Hostikka et Mc Grattan [3] par exemple. On renverra également au travail de synthèse sur le thème rayonnement dans les feux par J.F. Sacadura [4]. Nous disposons d'un code numérique MIRABELLE (Modeling Infrared Radiation Attenuation By Eulerian Lagrangian Linked Equations) qui simule la dynamique de ces écoulements diphasiques où l'air est entraîné par la chute des gouttelettes d'eau. Les résultats sont couplés avec une simulation des transferts thermiques dans le brouillard d'eau impliquant des phénomènes de convection, diffusion turbulente, rayonnement et évaporation. En particulier le rayonnement est traité par la méthode de Monte Carlo, les propriétés radiatives étant issues d'une détermination préalable par association de la théorie de Mie (pour les gouttes d'eau) et du modèle C-k (pour les gaz : vapeur d'eau et dioxyde de carbone). Pour la description de la physique de l'interaction entre le rayonnement et une particule sphérique représentant la goutte, nous renvoyons en particulier à Modest [5]. Les caractéristiques de pulvérisation d'une buse étant définies (granulométrie, débit d'eau, direction d'éjection des gouttes), nous pouvons prédire la fraction volumique locale en gouttes et en vapeur d'eau, puis l'atténuation du rayonnement thermique qui en résulte en différents points du brouillard d'eau. Nous avons effectué ce travail et validé les résultats par comparaison avec des mesures de transmission dans l'infrarouge réalisées sur une pulvérisation à l'échelle du laboratoire [1]. Une première étude en rampe nous avait permis de vérifier la possibilité d'adapter notre code de calcul à une situation de pulvérisations multiples [6]. Après cette étape de faisabilité, nous avons entrepris de comparer de façon plus fine les

résultats d'atténuation obtenus pour différentes stratégies de production du brouillard d'eau. Le code mis au point est donc mis à profit ici pour analyser des résultats originaux (mais la modélisation elle-même ne sera que résumée succinctement). Nous avons étudié l'augmentation de l'atténuation avec le débit, puis comparé dans des conditions définies de débits d'eau l'atténuation du rayonnement produite par plusieurs rampes associées en parallèle avec un écartement variable, et enfin testé le cas d'une pulvérisation en configuration ascendante (gouttelettes éjectées vers le haut). L'idée de départ est qu'en dépit de quantités d'eau imposées et de distribution de gouttes identiques, le fort couplage entre mécanique des fluides et thermique peut produire des résultats extrêmement différents.

Dans ce qui suit, nous présentons succinctement l'outil numérique dans la mesure où il a déjà fait l'objet d'une description plus détaillée dans la littérature. Nous proposerons ensuite un ensemble de résultats comparés en terme d'atténuation du rayonnement en mettant en avant le rôle du temps de séjour des gouttes dans le brouillard.

2. Modélisation

Notre simulation repose sur le couplage de trois modules dédiés : 1. au suivi lagrangien des gouttes d'eau pulvérisées par la buse, 2. à la simulation eulérienne de l'écoulement d'air humide, 3. à la propagation du rayonnement par méthode de Monte Carlo. La figure 1 montre la complexité du problème et les niveaux de couplage dus à l'influence réciproque d'un module sur l'autre.

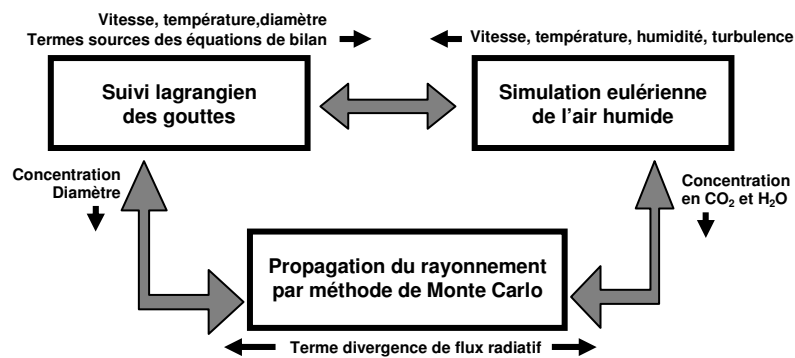


Figure 1. Schéma de principe de la simulation et niveaux de couplage

Sans reprendre la modélisation dans sa totalité (on renvoie ici à Collin [1] et [7] pour la description détaillée de la modélisation avec validation au cas par cas de chaque sous-modèle et la validation de l'ensemble), nous rappelons ici quelques éléments importants parmi nos choix de modélisation :

- le suivi lagrangien permet l'enregistrement des positions successives, de la vitesse, de la masse et de la température d'un grand nombre de gouttes, puis par traitement statistique d'évaluer la concentration en gouttes, la taille moyenne, mais aussi les termes sources de quantité de mouvement, turbulence et énergie à prendre en compte dans la simulation de l'air humide entraîné. Les effets physiques pris en compte comprennent les forces de gravité et traînée, les effets thermiques de convection et évaporation, et la dispersion turbulente.
- la simulation eulérienne comprend la résolution classique par volumes finis d'équations de bilan sur la masse, la quantité de mouvement, l'énergie et l'humidité avec association avec un modèle de turbulence de type $k-\varepsilon$.
- le suivi de quanta mis en place pour prédire la propagation du rayonnement repose sur une distance d'interaction basée sur le coefficient de diffusion, l'absorption de rayonnement étant redistribuée le long du trajet optique pour prendre en compte une

éventuelle hétérogénéité des propriétés radiatives dans le milieu. Les propriétés radiatives sont établies après importation des champs de concentration obtenus grâce aux parties eulériennes et lagrangiennes du code (additivité simple de propriétés issues de la théorie de Mie et du modèle C-k).

3. Simulation numérique

Le cas traité ici correspond au schéma de principe décrit sur les figures 2a-2b. Le scénario considère un panneau rayonnant qui émet du rayonnement avec une densité de flux de 37 kW/m^2 et la signature spectrale d'une surface noire à 1000°C . Le rayonnement est reçu par une cible placée à 3 m. Un brouillard d'eau est produit par des buses placées à mi-distance entre source et cible, produisant un rideau agissant comme un bouclier radiatif. Le rayonnement issu de la source est donc atténué par absorption et diffusion à travers le milieu gaz-gouttelettes généré par les buses et nous pouvons comparer le rayonnement reçu avec et sans action du rideau d'eau. Le rapport des flux donne l'équivalent d'une transmittance T à travers le brouillard et le complément est l'atténuation due au brouillard : $A = 1 - T$. L'atténuation A correspond à tout ce qui n'atteint pas la cible à protéger, englobant les phénomènes d'absorption et de réflexion.

Les conditions de calculs sont les suivantes : débit par tuyère $2,09 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, distance entre buses fixant la densité de tuyères : 10 cm. Les tuyères sont vues de dessus sur la figure 2a avec les empreintes de sprays elliptiques générées, et les plans de symétrie que l'on peut en déduire (également visibles sur la figure 2b). Cette configuration nominale correspond pour la rampe complète à 10 buses par mètre, soit à un débit de base injecté $Q_v = 2,09 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s/m}$. Lorsque nous ferons varier le débit nous introduirons un multiple entier de ce débit de référence. La distribution granulométrique est fixée par une loi de type Rosin-Rammler avec les paramètres suivants : diamètre moyen $D_{rr} = 310 \mu\text{m}$ et paramètre de dispersion $\delta_{rr} = 2,66$. L'injection se fait selon un cône plein, de section elliptique, avec des angles maximaux d'injection de 16 et 40° . Les dimensions du domaine de calcul sont $3\text{m} \times 5\text{cm} \times 3\text{m}$. On considère donc une dimension transversale de 5 cm (direction parallèle à la rampe) bordée par les plans de symétrie définis grâce à la répétitivité du problème au niveau de chaque tuyère et à mi-distance entre tuyères. Les autres frontières, le sol compris, sont du type parois noires. Les conditions de température et d'humidité imposées pour les parois, l'air ou l'eau injectée sont du type conditions ambiantes (293K , 50% humidité relative). Le niveau de couplage entre le rayonnement et le reste du problème est quasiment dans un seul sens : la dynamique influence les propriétés radiatives et par suite les niveaux d'atténuation, mais en retour l'absorption de rayonnement n'affecte pas (ou très peu) les caractéristiques des gouttes parce que leur chute s'effectue en trop peu de temps (injectées à 18m/s , elles sont au sol en quelques secondes car bien que freinées dans l'air elles restent transportées par l'air entraîné vers le bas). Nos essais de couplage en bouclant plusieurs fois selon le schéma de la figure 1 nous ont indiqué qu'un calcul direct suffit (en conservant toutefois le couplage eulérien-lagrangien bien sûr). Le maillage utilisé est du type structuré, resserré dans la zone de spray et aux bords du domaine, constitué de 18000 mailles.

Le résultat typique obtenu en terme d'atténuation est donné par la figure 3. On montre ici comment l'atténuation en % évolue avec la position verticale, pour plusieurs débits multiples de Q_v , au niveau de la cible (l'atténuation est en fait invariante selon la dimension transversale et nous présentons uniquement des données en fonction de la coordonnée Z). $Z = 1,5 \text{ m}$ correspond au niveau haut de la cible (et au point d'injection) et $Z = 0$ correspond au niveau du sol. On observe une amélioration de l'atténuation vers le bas. Cela s'explique par la dynamique des gouttes qui sont freinées au fur et à mesure de leur chute, ce qui induit une augmentation de la quantité de gouttes d'eau traversées par le rayonnement quand Z décroît,

d'où des propriétés radiatives croissantes en raison de la contribution des gouttes et donc une meilleure atténuation. Partant du niveau obtenu pour le débit Q_v , on pourrait extrapoler le résultat prévisible avec un débit supérieur (ici $2 Q_v$ à $4 Q_v$) sur la base de la transmission calculée sur une épaisseur optique double ou quadruple de celle prédite pour le débit Q_v . On voit sur la figure 3 que le calcul complet qui introduit dans la partie radiative une dynamique réaliste du spray montre un effet de non-linéarité très clair. Les courbes continues issues de la simulation complète pour les différents débits prédisent une atténuation plus basse que l'extrapolation simple des résultats prédits pour le débit Q_v . Là encore, l'explication vient de la partie eulérienne-lagrangienne du code : le débit d'eau supérieur entraîne l'air plus rapidement, qui en retour impose une vitesse des gouttes plus grande. La conséquence est que l'eau supplémentaire injectée est plus vite au sol et que l'atténuation résultante est moins forte que ce que l'extrapolation simple laissait prévoir.

Voyons à présent si l'augmentation du débit d'eau, à même de produire une atténuation plus forte, peut produire de meilleurs résultats en utilisant plusieurs rampes. La distance entre rampes est D , fixée successivement à 0, 10, 20 et 30 cm. Le cas $D = 0$ sera notre nouvelle référence puisqu'il correspond à la situation précédente avec un débit $2 Q_v$. La figure 4 montre l'atténuation obtenue pour différents écartements. Rappelons que dans chaque cas le débit d'eau utilisé est le même. On constate pourtant un meilleur résultat en augmentant l'écartement des buses, avec toutefois une saturation à partir de 20 cm. L'explication vient là encore d'une dynamique différente au niveau des sprays comme le montrent les figures 5a et 5b. Les vitesses de l'air entraîné sont représentées par des vecteurs dans un plan transversal qui passe par les tuyères dans le domaine de calcul. La vue est limitée dans la portion du domaine entourant les buses d'injection considérées. On observe, pour une rampe unique (Figure 5a), un entraînement vers le bas clairement lié à l'injection des gouttes, la buse étant positionnée à 1,5m du sol. Pour un cas avec une double rampe (écartement de 20cm sur la figure 5b) on observe au contraire deux zones d'entraînement liées à chaque spray et surtout une zone centrale avec deux boucles. En particulier, l'air ascendant en zone centrale, zone où les gouttes tombent à contre-courant, va d'autant mieux ralentir leur chute. Globalement, les gouttes moins vite entraînées vers le bas conduisent à une quantité d'eau supérieure à une position donnée, à une contribution à l'épaisseur optique supérieure, et à une meilleure atténuation. On conçoit que cette interaction entre sprays va décliner avec l'écartement et qu'un éloignement trop grand induirait deux sprays indépendants l'un de l'autre. On ne gagne déjà plus d'atténuation dans les conditions présentes avec un écartement de 30cm.

On considère maintenant une pulvérisation ascendante : la buse est placée à 10 cm du sol et on envoie le spray vers le haut. Après plusieurs tests, nous avons augmenté la taille du domaine jusqu'à 6 m pour ne pas subir l'influence de la paroi supérieure et dans les conditions du débit de référence Q_v nous comparons l'atténuation par le rideau d'eau en injection ascendante et descendante (Figure 6). La différence est spectaculaire avec une atténuation quasiment 4 fois plus grande en spray ascendant. Cela tient au temps de séjour largement supérieur des gouttes, qui injectées avec la même vitesse mais vers le haut cette fois, vont décélérer rapidement sous l'effet de la traînée, mais aussi de la gravité. Elles atteignent une position verticale maximale avant de retomber avec cette fois une vitesse initiale de chute nulle. On a donc deux passages de la goutte dans le domaine du rideau avec une chute plus lente, d'autant que les gouttes en phase ascendante entraînent aussi l'air vers le haut induisant pour les gouttes en phase descendante une chute à contre-courant. Autant de phénomènes dynamiques qui expliquent une atténuation bien meilleure. Cette explication liée à une meilleure utilisation de l'eau est illustrée sur la figure 7 où la quantité d'eau est visualisée en fonction de la position verticale, à partir d'une fonction $F(Z)$ en m^3/m qui correspond au volume d'eau évalué à une position verticale divisé par la hauteur de la maille

(pour éviter les problèmes de comparaison liés à des tailles de mailles évolutives). Si les débits d'eau consommés sont les mêmes en configuration ascendante ou descendante, on voit bien que les différences de vitesse des écoulements de gouttes induisent une grande disparité dans la quantité d'eau disponible pour l'atténuation à une hauteur donnée. En pulvérisation descendante, l'eau projetée rapidement vers le bas induit de faibles concentrations tandis qu'une meilleure utilisation est faite en projection ascendante pour les raisons évoquées plus haut.

Le critère qualitatif qui ressort de ces essais est le temps de séjour des gouttes entre pulvérisation et évacuation au sol. Il est clair que l'intérêt de la solution « pulvérisation ascendante » est d'éviter de projeter l'eau au sol. Reste toutefois à rappeler que ce critère ne doit pas être déconnecté de la notion de stabilité du brouillard d'eau, ce qui pourrait être étudié en soumettant le rideau à un écoulement d'air latéral simulant l'effet du vent ou les forts dégagements convectifs d'un feu par exemple. Il s'agit là de pistes que nous allons explorer par la suite. On n'oubliera pas les autres paramètres cruciaux que sont la taille des gouttes, le type de buses, etc...

4. Conclusion

Nous avons simulé numériquement l'atténuation de rayonnement dans l'infrarouge produite par un bouclier radiatif créé par un rideau d'eau. Différentes configurations de tuyères mises en parallèle ont été étudiées. Il apparaît que certaines associations de buses sont néfastes si l'entraînement d'air induit par les pulvérisations conduit à une accélération des gouttes et à une diminution de leur temps de chute. Un écartement judicieux entre buses peut au contraire susciter des re-circulations qui prolongent le temps de séjour des gouttes. Enfin, le gain d'une pulvérisation ascendante est clairement mis en évidence dans la mesure où les gouttes contribuent deux fois à l'atténuation du rayonnement lors de leur trajectoire (en phase ascendante puis descendante avec vitesse descendante initiale nulle).

Références

- [1] A. Collin *et al.*, Numerical simulation of a water spray - Radiation attenuation related to spray dynamics. *Int. J. of Thermal Sciences* 46 (9), (2007) pp 856-868.
- [2] F. Nmira, Modélisation et simulation numérique de l'interaction entre un feu et un brouillard d'eau, Thèse de l'Université de Provence (2007).
- [3] S. Hostikka et K. Mc Grattan, Numerical modeling of radiative heat transfer in water sprays. *Fire Safety J.* 41 (1), (2006) pp 76-86.
- [4] J.F. Sacadura, Radiative heat transfer in fire science. *J. Quant Spec. Rad. Tr.*, 93, (2005) pp 5-24.
- [5] M. Modest, Radiative heat transfer, Mc Graw-Hill International Editions (1993).
- [6] A. Collin *et al.*, Application de la méthode de Monte Carlo à l'étude du transfert radiatif dans un rideau d'eau. Congrès Français de Thermique (Ile de Ré, 16-19 Mai 2006), 483-488.
- [7] A. Collin, Transferts de chaleur couplés rayonnement-conduction-convection – Application à des rideaux d'eau soumis à une intense source radiative. Thèse UHP-Nancy 1 (2006).

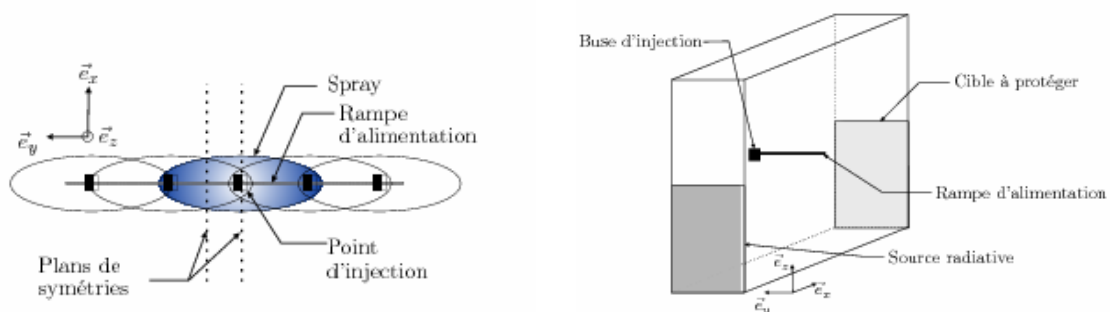


Figure 2a : Vue du dessus de la rampe de pulvérisation Figure 2b : Domaine de calcul et rampe de pulvérisation

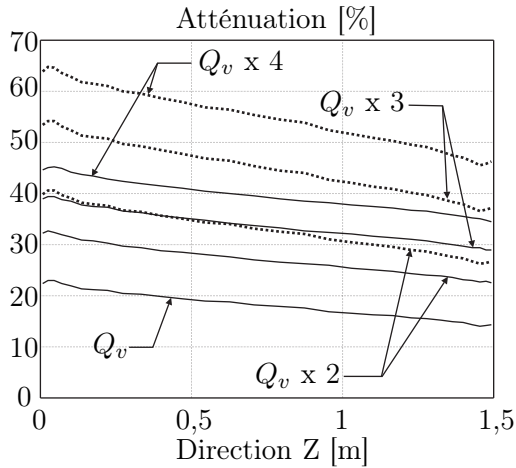


Figure 3 : Atténuation en fonction de la hauteur. Effets du débit d'eau utilisé : calcul complet (ligne continue) et extrapolations simples du résultat obtenu pour un débit Q_v (pointillés).

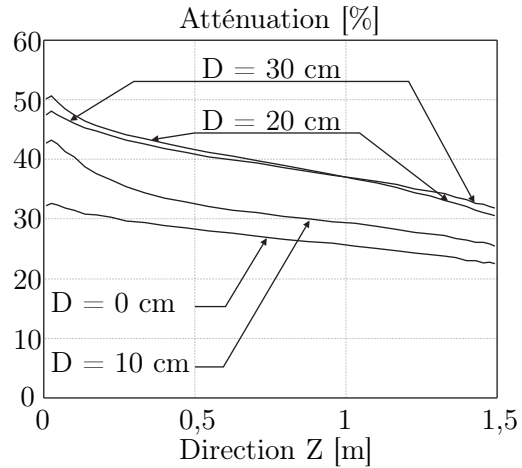


Figure 4 : Atténuation en fonction de la hauteur avec deux rampes en parallèle, séparées d'une distance D pour le même débit global : $2Q_v$.

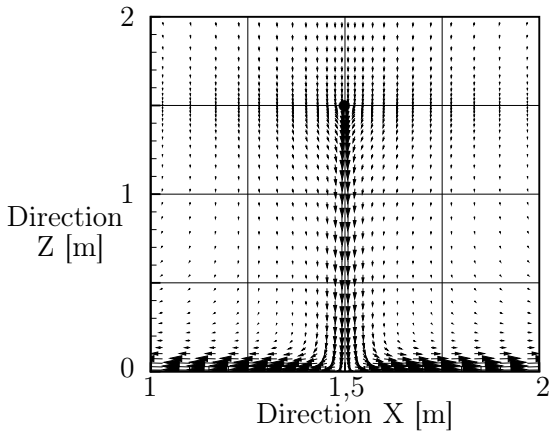


Figure 5a: Visualisation de l'écoulement d'air entraîné pour un débit de référence $2Q_v$.

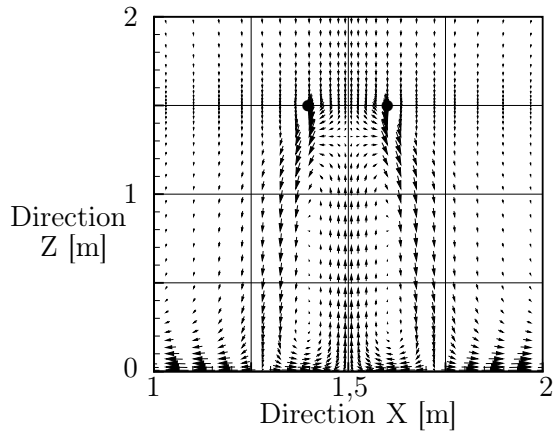


Figure 5b: Ecoulement d'air pour le débit $2Q_v$, injecté avec deux rampes distantes de $D = 20$ cm.

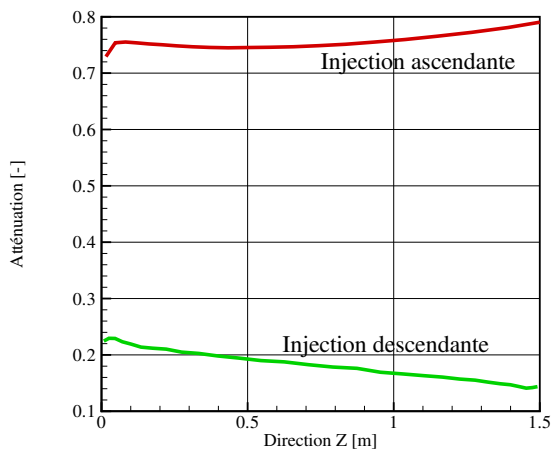


Figure 6 : Atténuation en fonction de la hauteur pour deux type d'injections : ascendante et descendante.

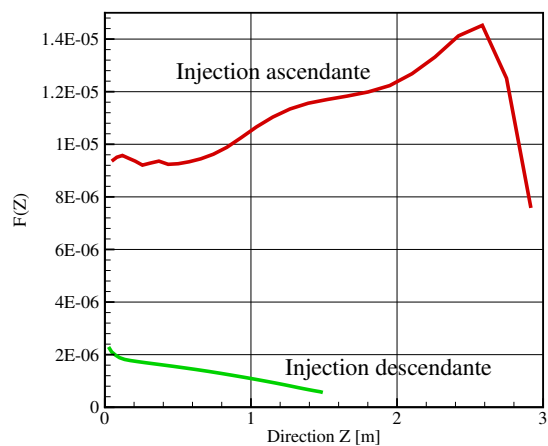


Figure 7 : Quantité d'eau en m³ d'eau par m de hauteur dans les deux configurations d'injection.