

Effets du changement climatique sur la Meuse

Modélisation hydraulique de la source à l'embouchure

Rapport de synthèse du WP1 - Action 6



INTRODUCTION

Le projet AMICE offre l'opportunité d'utiliser des scénarios, des méthodes et des outils communs pour évaluer des mesures contre les effets du changement climatique sur le bassin versant de la Meuse et d'élaborer des stratégies qui pourront être comparables entre les pays.

Le projet AMICE, qui s'étend de 2009 à 2012, est divisé en 5 Work Packages.

Les objectifs du Work Package 1 sont déclinés en 9 Actions. Ce rapport expose en détail les méthodes et les résultats de l'Action 6, qui a été réalisée durant l'année 2010 et 2011. Cette action est coordonnée par l'Université de Liège.

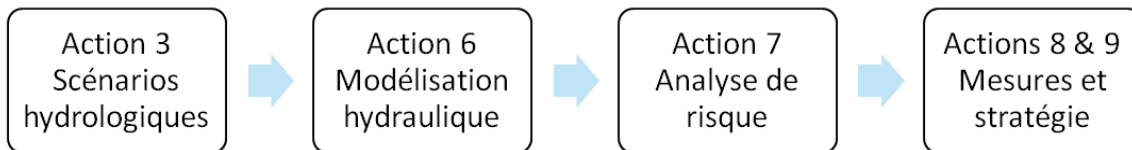


Figure 1: La modélisation hydraulique est une composante-clé de l'analyse et de la gestion des risques d'inondation.

Ce rapport fait suite à un premier travail coordonné par l'Université de Metz dans le cadre de l'Action 3. Suite à ce travail préliminaire, tous les partenaires du projet AMICE ont convenu d'utiliser les scénarios suivants pour les inondations (scénario humide) et étiages (scénario sec) futurs, dans le contexte du changement climatique :

- Une augmentation des valeurs $Q_{h_{100}}$ de **+15% pour 2021-2050** et de **+30% pour 2071-2100**. $Q_{h_{100}}$ représente le débit de crue centennal de la Meuse,
- Une diminution des valeurs MAM7 de -10% pour 2021-2050 et de -40% pour 2071-2100. MAM7 représente le minimum annuel des débits moyens sur 7 jours.

La nécessité d'élaborer un modèle hydraulique international cohérent pour quantifier les conséquences des crues futures

La modélisation hydraulique est une étape essentielle de la compréhension des conséquences des crues (futures). Des mesures et des stratégies ont été développées pour estimer leurs impacts, dans l'hypothèse du changement climatique.

La modélisation hydraulique est nécessaire pour quantifier les dommages causés par les crues. Ce type de modèle fournit des informations distribuées sur les hauteurs d'eau, les vitesses d'écoulement et la durée de la crue. Celles-ci peuvent être utilisées pour cibler des mesures et développer des politiques visant à diminuer, voire à éviter, les dommages. Par ailleurs, la modélisation hydraulique se révélera utile pour tout le projet AMICE. Sa mise en œuvre transfrontalière pourra être utilisée par d'autres études à travers le monde. Enfin, les résultats de la modélisation hydraulique peuvent servir à des fins de communication, par exemple pour établir, lors de crues, les cartes des zones inondées destinées à la sensibilisation du public.

Des modèles hydrauliques ont déjà été développés pour la Meuse et certains de ses affluents dans chaque pays concerné. Bien que ces modèles aient certaines caractéristiques communes, leurs différences ne permettent pas de fournir directement des résultats cohérents tout le long de la Meuse. C'est pourquoi l'objectif premier de l'**Action 6** est de construire un **modèle hydraulique international cohérent**. L'approche adoptée consiste à coupler les modèles des différents pays et à développer une procédure commune pour que les calculs se réalisent en parallèle.

Les étapes suivantes ont été suivies pour mener à bien l'Action 6 :

1. Dans chaque région, collecte et comparaison des informations des modèles et des jeux de données existants,
2. Développement d'une méthodologie commune pour la modélisation hydraulique qui inclut le choix de conditions aux limites cohérentes pour tout le cours de la Meuse ainsi que les principes de calcul en parallèle des modèles,
3. Calcul en parallèle des modèles hydrauliques dans les différentes régions. Contrôle de la cohérence des résultats à chaque frontière après un premier calcul. Si nécessaire, ajustement des conditions aux limites pour assurer la continuité entre les modèles au droit des frontières et réalisation d'un deuxième calcul,
4. Calculs sur base du scénario humide AMICE et analyse de l'impact du changement climatique :
 - à l'échelle de la Meuse en différents points et pour différents tronçons : impacts sur le niveau d'eau atteint, les surfaces inondées, le volume stocké...
 - à l'échelle locale : dresser des cartes de zones inondées pour le scénario humide et déterminer comment la vulnérabilité de certains points d'intérêts est susceptible d'évoluer avec le changement climatique.

Cohérence et différences entre les modèles hydrauliques

Collecte des informations et des données des modèles utilisés dans chaque région

Des modèles hydrauliques ont déjà été développés pour chaque pays. Cependant, **ceux-ci n'utilisent pas les débits ni les niveaux d'eau provenant des modèles situés en amont ou en aval**. En outre, des différences **importantes** existent **entre chacun**. Cette situation exige manifestement l'adoption d'une approche transnationale cohérente.

En analysant les modèles existants, les observations suivantes peuvent être faites :

- Ces modèles couvrent pratiquement tout le cours de la Meuse depuis la source jusqu'à l'embouchure. L'Allemagne utilise son modèle sur la rivière Roer qui est un des principaux affluents de la Meuse (voir Figure 2).
- Des différences significatives existent entre les modèles, reflétant les différences sur le plan des caractéristiques du bassin, mais aussi certains besoins spécifiques des utilisateurs :
 - o en termes de représentation spatiale, les modèles se distinguent par une description unidimensionnelle, basée sur les sections transversales du lit du fleuve et des plaines inondables (par ex. aux Pays-Bas), à la description complètement bidimensionnelle basée sur une altimétrie laser et une bathymétrie sonar (par ex. en Wallonie),
 - o dans le temps, les modèles peuvent être instationnaires ou stationnaire. La France, la Flandre, l'Allemagne et les Pays-Bas utilisent des modèles instationnaires tandis que la Wallonie utilise un modèle stationnaire.

Ces différences entre les types de modèles utilisés sont imputables à la topographie du bassin versant de la Meuse (Figure 3). En effet, il peut être subdivisé en trois zones géologiques principales. Alors que les parties sud et nord se caractérisent par **des plaines inondables très étendues**, dans la partie centrale du bassin de la Meuse, entre Charleville-Mézières et Liège, la Meuse est emprisonnée dans le massif des Ardennes qui est caractérisé par **des vallées étroites et pentues**. Ces caractéristiques topographiques sont des facteurs décisifs durant les crues car ils déterminent les possibilités d'amortissement **des ondes de crue**. Elles déterminent donc le type de modélisation hydraulique à utiliser dans les différentes parties du bassin et, notamment, le choix entre une modélisation stationnaire ou instationnaire.

Notions de base en modélisation hydraulique

Selon les caractéristiques et le fonctionnement du cours d'eau, différents types de modèles hydrauliques peuvent être utilisés.

Les modèles peuvent être stationnaires ou bien instationnaires. Dans le premier cas, on considère que le débit ne varie pas en fonction du temps. Ainsi, une valeur statistique unique du débit maximal est utilisée (pour le projet AMICE, Q_{h100}). Cette hypothèse est préférable pour les vallées encaissées.

Dans le second cas, le débit varie avec le temps : des hydrogrammes sont utilisés comme conditions aux limites amont. Dans les larges plaines inondables où un stockage intervient, ces modèles sont plus pertinents car ils peuvent prendre en compte la réduction du débit dû au phénomène de stockage de l'eau dans le lit majeur.

De plus, les modèles peuvent être unidimensionnels ou bidimensionnels : pour le premier, l'écoulement de l'eau est censé suivre une direction unique, tandis que pour le second, le modèle considère différentes directions d'écoulement relatives à la topographie spécifique de la plaine inondable.

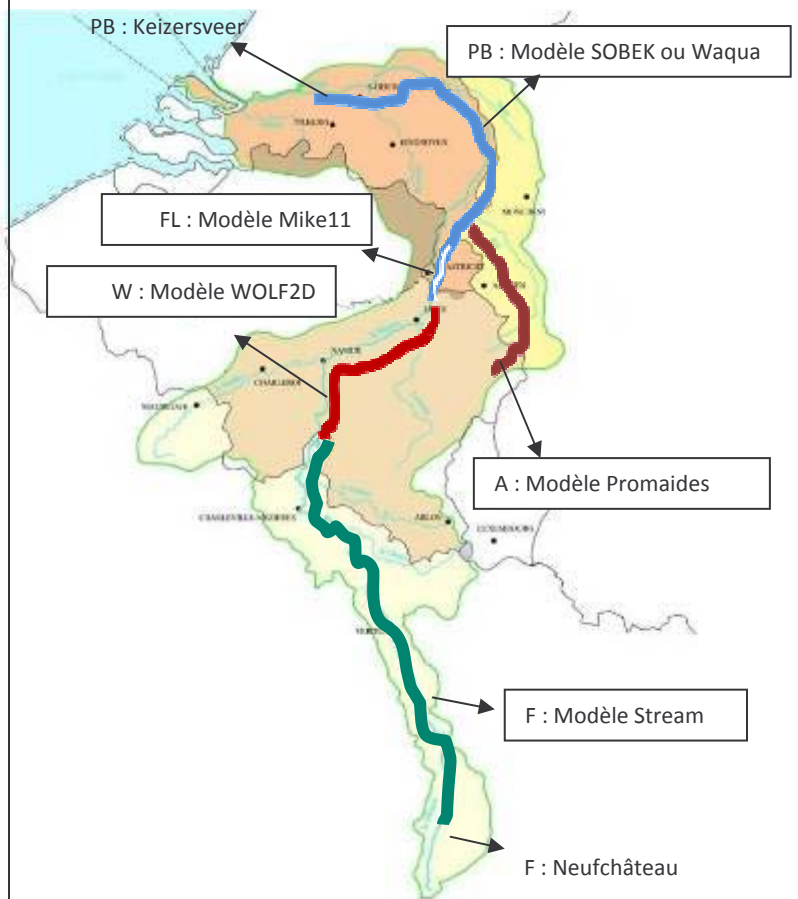
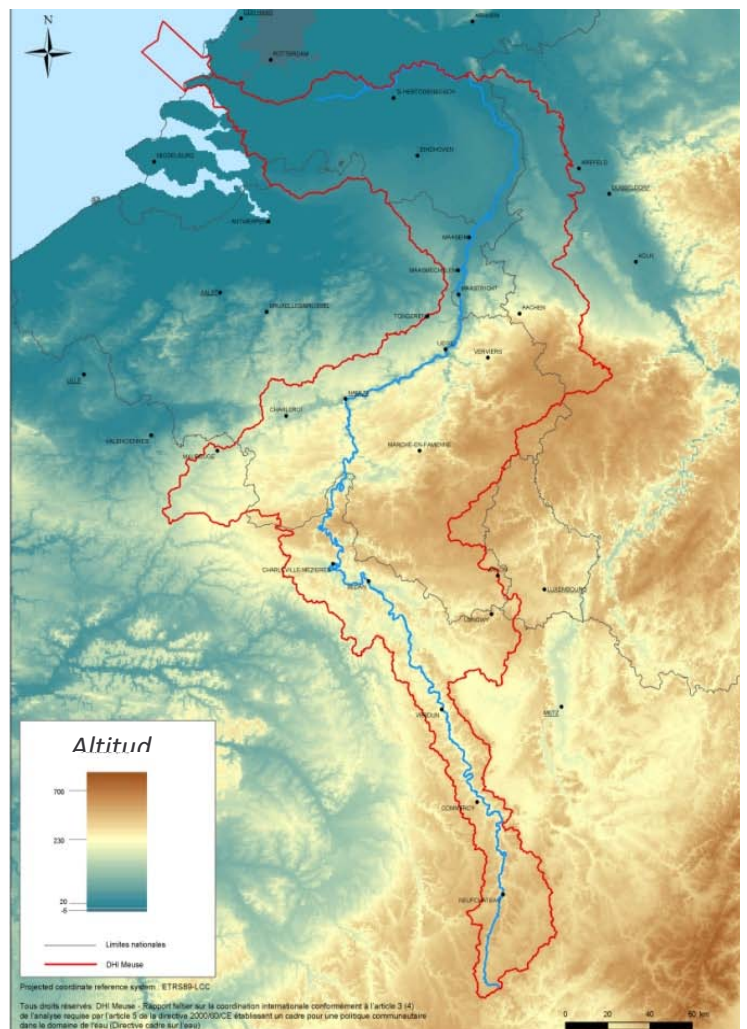


Figure 2: Tronçons couverts et modèles hydrauliques correspondants.

Figure 3: Le bassin de la Meuse



Assurer la cohérence aux frontières par les conditions aux limites

Les modèles hydrauliques nécessitent une condition limite amont et une condition limite aval, qui peuvent être constantes dans le temps dans le cas des modèles stationnaires ou dépendantes du temps dans le cas des modèles instationnaires. En règle générale, la condition limite amont est un débit et la condition limite aval un niveau d'eau. Le niveau d'eau peut se calculer à partir d'un débit si l'on connaît une relation hauteur-débit.

Actuellement, chaque modèle hydraulique utilise soit des résultats de modèles hydrologiques, soit des statistiques hydrologiques dérivées d'observations aux stations de mesure existantes.

Toutes les stations de mesures du bassin de la Meuse ont enregistré des données historiques pendant une période allant de 25 à 50 ans, voire 100 ans à Borgharen (PB). Ces séries temporelles permettent de calculer Qh_{100} qui est la condition limite amont utilisée pour les simulations hydrauliques. Les valeurs de Qh_{100} à chaque frontière sont récapitulées sur la carte ci-dessous (Figure 4).

Les différences entre les séries hydrologiques utilisées s'avèrent faibles : les statistiques des débits aux frontières révèlent que les valeurs diffèrent de 2% à 3% maximum à Lixhe (frontière entre la Wallonie et les Pays-Bas) et de moins de 1% à Chooz (frontière entre la France et la Wallonie).

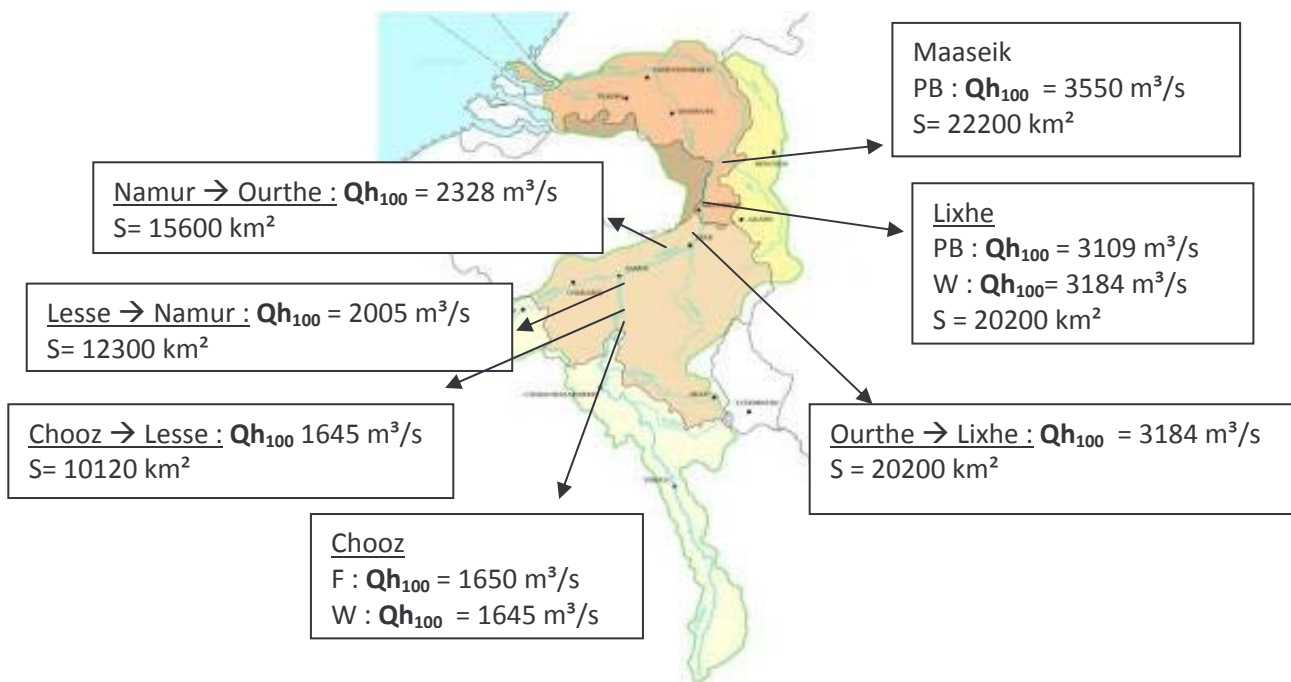


Figure 4: Débit Qh_{100} et surface du bassin versant (S) pour chaque tronçon de la Meuse.

Construire une méthodologie pour la modélisation hydraulique

Après vérification de la cohérence des valeurs hydrologiques aux frontières nationales, il subsiste toutefois une divergence entre les approches de modélisation stationnaire et instationnaire.

Afin d'assurer la cohérence entre les simulations dans chaque région, l'approche suivante a été adoptée :

1. Définir des conditions aux limites cohérentes entre les régions,
2. Déterminer une méthodologie pour réaliser les simulations. Il faut dès lors choisir entre une approche entièrement stationnaire ou instationnaire et décider d'exécuter simultanément ou en parallèle les simulations.

Pour la 1^{ère} étape, les équations mathématiques résolues par les modèles (équations de Saint-Venant ou équations des eaux peu profondes) requièrent des conditions aux limites appropriées :

- les conditions limites amont sont soit la valeur maximale du débit $Q_{h_{100}}$ à la station de mesure pour les modèles stationnaires, soit un hydrogramme pour les modèles instationnaires,
- les conditions limite aval sont les hauteurs d'eau déterminées par une relation hauteur-débit.

Pour les simulations de l'Action 6, il a été convenu d'adopter les conditions aux limites suivantes :

- des données mesurées sont utilisées au point amont le plus haut, à Neufchâteau (débit), et à la limite la plus aval, à Keizersveer (niveau d'eau).
- toutes les autres conditions aux limites dépendent des résultats des autres modèles.

Une question importante à résoudre dans le cadre de l'Action 6 du Projet AMICE était de savoir s'il fallait exécuter tous les modèles en série en utilisant une simulation entièrement stationnaire ou instationnaire pour tout le cours de la Meuse, ou bien s'il fallait ajuster les différences existantes entre les modèles puis les faire calculer en parallèle.

La première approche n'est pas apparue satisfaisante car elle n'aurait pas permis une utilisation optimale du temps disponible dans le cadre du projet AMICE.

Par conséquent, la procédure de modélisation retenue **combine des modélisations instationnaire et stationnaire. Le choix du type de simulation repose sur la** pratique existante dans chaque région et est dépendant des capacités de stockage des plaines inondables. La procédure commune **permet aussi les calculs en parallèle** des modèles (plutôt que séquentiellement) et **assure une continuité des résultats aux frontières**.

Finalement, la méthodologie choisie est une procédure en deux étapes. Premièrement, tous les modèles hydrauliques sont utilisés séparément sur base de conditions limites aval mesurées ou extrapolées. Ensuite, la cohérence des résultats des simulations aux frontières est contrôlée et, si nécessaire, une seconde exécution des modèles (ou sous-modèles) est effectuée. Lorsqu'une seconde exécution s'est avérée nécessaire, l'utilisation de conditions aux limites, reprises des modèles situés à l'aval, a permis d'assurer la continuité au droit des frontières (Figure 5).

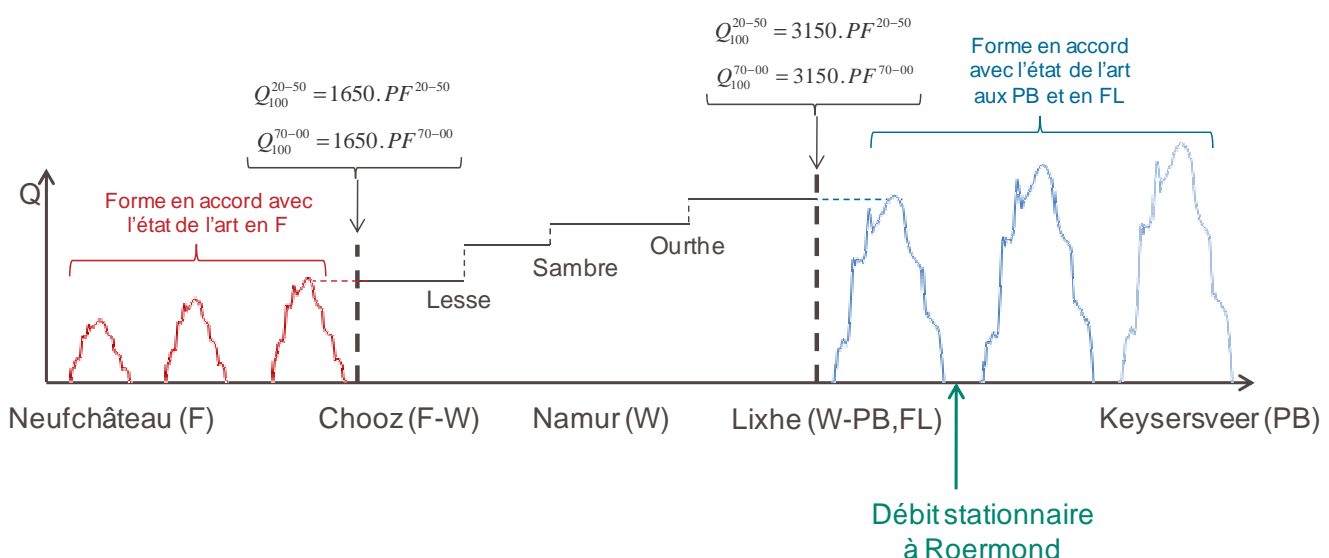


Figure 5: Schéma de répartition des débits le long de la Meuse. Les modèles instationnaires sont utilisés entre Neufchâteau et Chooz ainsi qu'entre Lixhe et Keizersveer, tandis qu'un modèle stationnaire est utilisé entre Chooz et Lixhe.

*PF : Facteur de perturbation

Contrôle de la cohérence aux frontières

Travail préliminaire : choix des points de comparaison et définition d'un système de référence commun pour comparer les résultats

Cinq points ont été choisis pour la comparaison des résultats après le premier calcul : Chooz à la frontière franco-wallonne, Lixhe à la frontière Wallonie-Pays-Bas, Linne et Borgharen pour la comparaison des modèles flamands et néerlandais et enfin Roermond pour les modèles néerlandais et allemands.

Ensuite, comme les systèmes de coordonnées et les référentiels altimétriques sont différents dans chaque région, les coordonnées spatiales des points choisis dans les différents pays ont dû être converties dans un système de projection commun pour permettre la comparaison des résultats des modèles hydrauliques. La longitude et la latitude ont été choisies comme système de coordonnées commun, tandis que le système de référence belge DNG (ou TAW) a été retenu pour les altitudes étant donné qu'il était déjà commun à la Wallonie et la Flandre.

Explication et suppression des différences à chaque frontière après le premier calcul

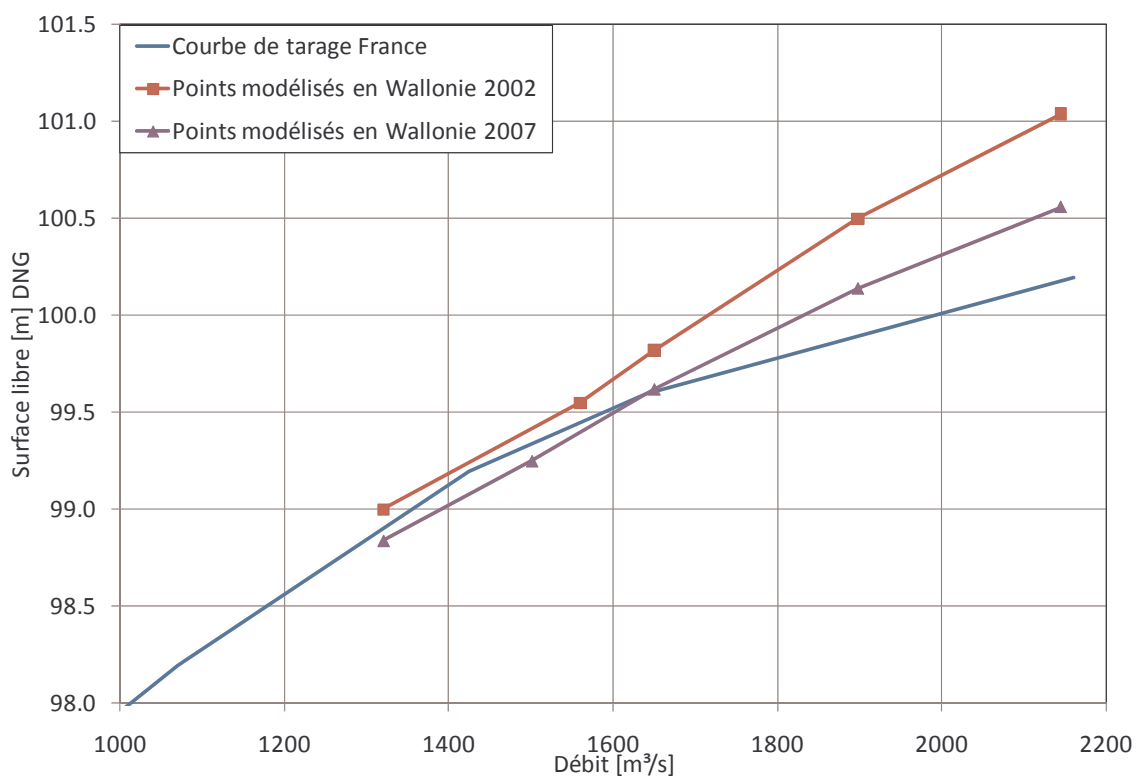


Figure 6: Écart entre la courbe hauteur-débit française utilisée comme condition limite aval et les niveaux d'eau wallons.

Après le premier calcul, la plus grande différence entre les niveaux d'eau (jusqu'à 1 mètre) a été constatée entre la France et la Wallonie. Cet écart résultait de trois éléments : une différence dans les relations hauteur-débit servant de condition limite aval au modèle français (Figure 5), un relevé bathymétrique de la Meuse qui n'avait pas été mis à jour en Wallonie et enfin un paramètre de rugosité du modèle français qui devait être corrigé dans la partie wallonne. Après rectification de ces paramètres, le deuxième calcul a abouti à une différence de seulement 10 cm à la frontière. Dans la Figure 6, le relevé bathymétrique de 2002 est désigné par "points modélisés en Wallonie 2002" et le relevé bathymétrique mis à jour est désigné par "points modélisés en Wallonie 2007".

Entre la Wallonie et les Pays-Bas, la différence était de moins de 20 cm après le premier calcul. Après une légère correction des conditions aux limites du modèle wallon, les résultats se sont avérés cohérents.

Entre la Flandre et les Pays-Bas, un écart de 30 cm a été relevé ainsi qu'une différence entre les débits de pointe des deux modèles. Ces différences n'ont pas été jugées suffisamment significatives pour procéder à un second calcul des modèles. Quelques petits écarts sont aussi apparus à Borgharen en raison des différences entre les formes des hydrogrammes néerlandais et flamand.

Finalement, l'Allemagne a ajusté les conditions limites amont de la Roer pour que le débit à Roermond soit cohérent. Cette valeur correspond à un $Q_{h_{100}}$ dans la Meuse. L'écart entre les débits de pointe simulé et attendu est inférieur à 5%.

Résultats et analyses

Après l'exécution de simulations cohérentes depuis la source jusqu'à l'embouchure de la Meuse, les résultats ont été analysés selon deux échelles complémentaires : l'échelle du bassin versant international et l'échelle locale.

Analyse des impacts du changement climatique à l'échelle du bassin versant

Hydrogrammes et débits de pointe

Les débits de pointe et, le cas échéant, les hydrogrammes, qui sont une des données de sortie des modèles hydrauliques, ont été calculés puis analysés pour les scénarios $Q_{h_{100}+15\%}$ et $Q_{h_{100}+30\%}$. En outre, des résultats concernant le fonctionnement général du bassin de la Meuse ont pu être dérivés des simulations, bien qu'ils ne soient pas directement liés aux conséquences du changement climatique.

En France, les hydrogrammes reflètent la contribution des affluents de la Meuse et montrent que les pics de débit et la durée de l'inondation augmentent progressivement avec la distance par rapport à la source. Au contraire, dans la région frontalière entre la Flandre et les Pays-Bas, entre Borgharen et Linne, le débit maximum diminue en se dirigeant vers l'aval car un léger amortissement a lieu dans les plaines inondables. Le temps de propagation calculé est d'environ 130 heures entre Neufchâteau et la frontière franco-belge et d'environ 20 heures entre Borgharen et Linne.

La figure 8 montre que le débit augmente progressivement entre la source et Givet. En Wallonie, le débit augmente par paliers correspondant aux apports des principaux affluents. Aux Pays-Bas, un léger amortissement est constaté entre Lixhe et Roermond tandis qu'un amortissement plus important s'opère en aval de Roermond en raison des vastes zones inondables disponibles aux Pays-Bas.

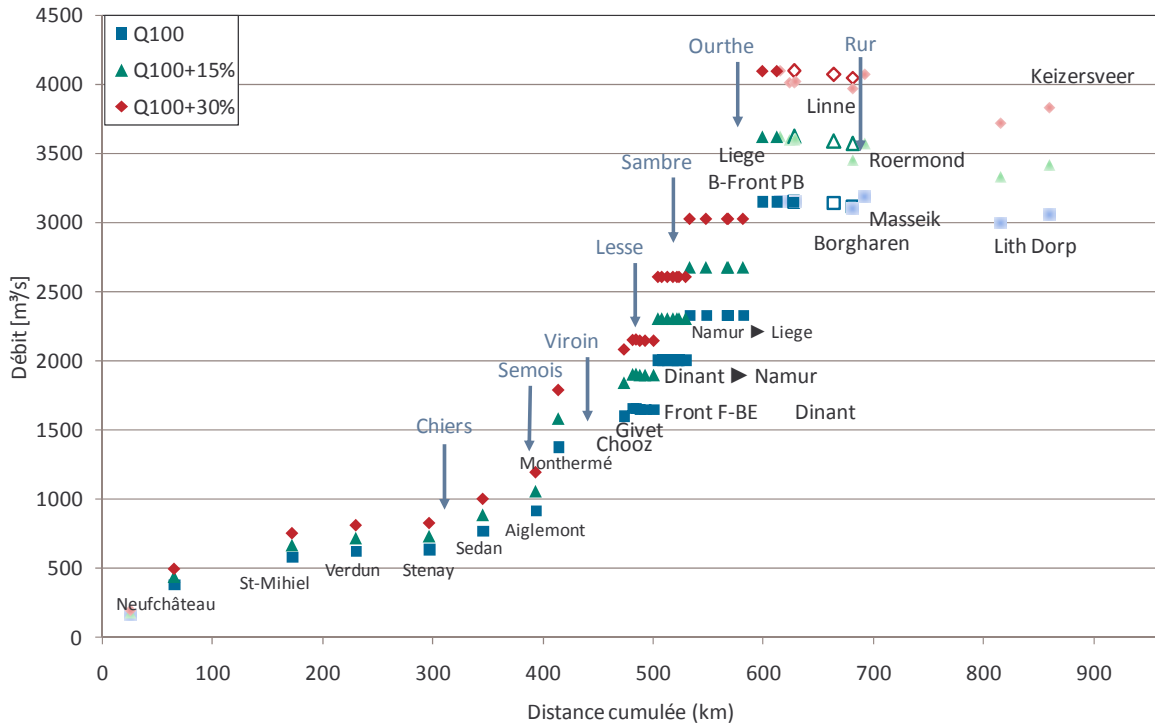


Figure 7: Comparaison entre les débits de pointe depuis la source jusqu'à l'embouchure pour les 3 scénarios de débit

Hauteurs d'eau, surfaces inondées et volumes stockés

D'autres données ont pu être ensuite comparées grâce à la modélisation hydraulique. En accord avec les caractéristiques topographiques de la Meuse, il ressort des résultats que les impacts du changement climatique peuvent fortement différer d'une région à l'autre.

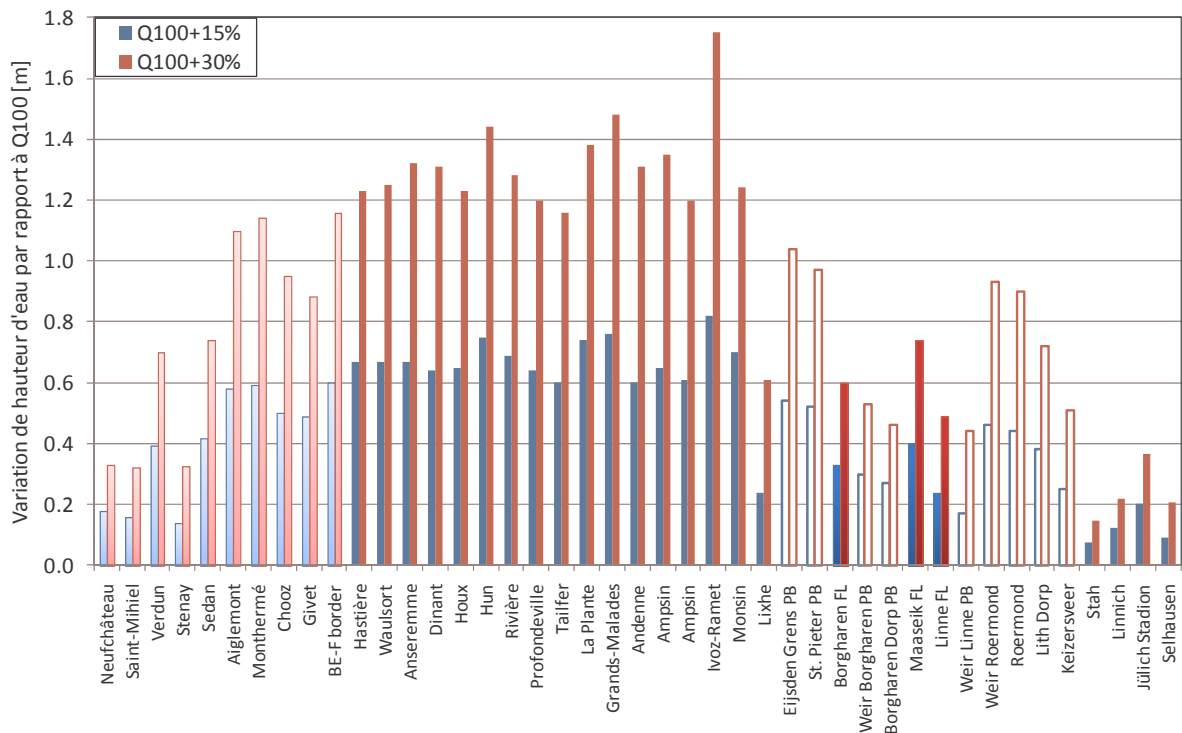


Figure 8 : Variation de la hauteur d'eau par rapport à Q_{h100} en différents points de comparaison

L'analyse de la variation de la hauteur d'eau aux points choisis le long des tronçons permet de dégager les conclusions suivantes (Figure 9) :

- Dans la partie amont et aval du bassin de la Meuse, les variations atteignent +30 cm (période 2021-2050) et +70 cm (période 2071-2100) tandis que dans la partie centrale et plus encaissée du bassin elles atteignent +60 cm et +1,3 m. Le fait que dans la partie centrale, le niveau d'eau soit plus sensible à l'augmentation du débit, est principalement lié à la topographie de la vallée.
- **Les surfaces inondées et le volume stocké** ont été ensuite calculés pour chaque tronçon. Dans chaque pays, leurs contributions relatives à l'augmentation totale pour $Q_{h_{100}+30\%}$ est ensuite calculée.
 - En France, les tronçons entre Verdun et Aiglemont se sont avérés les plus affectés par une augmentation du débit liée au changement climatique (chaque tronçon représente entre 15% et 30% de l'augmentation totale du territoire inondé pour le scénario $Q_{h_{100}+30\%}$).
 - En Wallonie, la partie du fleuve située entre Andenne et Monsin serait la plus affectée (Figure 9). Le tronçon Ivoz-Monsin, comprenant la zone industrielle de Liège, représenterait à lui seul environ 35% de l'augmentation totale du territoire inondé pour le scénario $Q_{h_{100}+30\%}$.
 - Aux Pays-Bas et en Flandre, le tronçon entre Lanaken et Kessenich est le plus affecté avec approximativement 35% de l'augmentation totale du territoire inondé, suivi par la partie de la Meuse appelée « Zandmaas » (environ 10%).

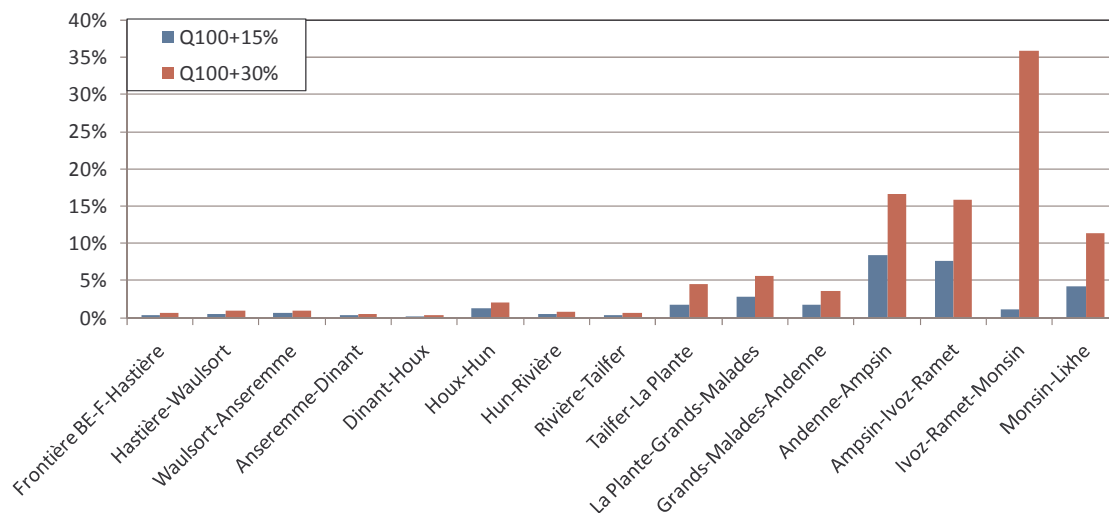


Figure 9. Contributions des surfaces inondées par tronçon comparées à l'augmentation totale des surfaces inondées pour $Q_{h_{100}+30\%}$ en Wallonie

Analyse des impacts du changement climatique sur l'inondation à l'échelle locale

Dans chaque pays, des points d'intérêts ont été choisis pour analyser en détails l'impact du changement climatique et des inondations résultantes. Pour chaque point, une carte a été dressée pour les trois scénarios calculés ($Q_{h_{100}}$, $Q_{h_{100}+15\%}$, $Q_{h_{100}+30\%}$).

En France, les villes de Givet et Charleville-Mézières ont été gravement touchées par l'inondation de 1995. À la suite de cet événement, des protections ont été construites (murs, digues, dérivations, zone de ralentissement dynamique des crues...). Toutes celles-ci n'ont pas encore été introduites dans les modèles. **Dans la situation la plus extrême ($Q_{h_{100}+30\%}$), elles pourraient s'avérer insuffisantes pour protéger ces deux villes.** Qui plus est, des parties stratégiques de la ville de Charleville-Mézières se trouveront inondées. Pour la ville de Verdun, les impacts du changement climatique sont limités en termes de zones inondées mais la hauteur d'eau pourrait augmenter de 40 à 60 cm.

En ce qui concerne la Wallonie, sa ville la plus importante, **Liège**, est actuellement protégée contre une inondation correspondant à la crue centennale. Les simulations ont montré que **le territoire inondé augmenterait considérablement avec la gravité des scénarios de changement climatique**.

Les points d'intérêt sélectionnés le long de la frontière entre les **Pays-Bas et la Flandre** correspondent à une partie de la Meuse mitoyenne. Si l'on fait abstraction d'une rupture de digue et du débordement qui s'ensuit, la carte d'inondation présente peu de différences au niveau du **territoire inondé**. Bien que l'étendue de ce dernier variera très peu avec le changement climatique, **les hauteurs d'eau devraient être modifiées**.

Pour **l'Allemagne**, seul le village d'Ophoven situé dans la partie aval de la rivière Roer, qui était déjà vulnérable aux inondations, voit sa **situation s'aggraver**.

Conclusions et perspectives

Données hydrologiques et modèles hydrauliques harmonisés sur toute l'étendue du bassin de la Meuse

Ce rapport synthétise les travaux de modélisation hydraulique réalisés dans le contexte du projet AMICE. Ces travaux, qui font partie du Work Package 1, Action 6, ont permis de développer une **méthodologie commune transnationale de modélisation hydraulique** et de réaliser la **première simulation coordonnée de l'écoulement de la Meuse depuis la source jusqu'à l'embouchure**. Afin d'estimer les impacts du changement climatique sur les inondations, la modélisation hydraulique transnationale a ensuite été testée sur base des scénarios humides AMICE qui ont été produits dans l'Action 3 : **Qh₁₀₀+15%** pour l'horizon 2021-2050 et **Qh₁₀₀+30%** pour 2071-2100.

Une sensibilité des niveaux d'eau aux changements des débits de crue qui reflète une structuration spatiale marquée

La modélisation hydraulique harmonisée a **montré que l'influence sur l'augmentation du niveau d'eau suite à un même changement dans l'amplitude du débit de crue s'avère approximativement deux fois plus forte dans la partie centrale du bassin en comparaison des parties supérieure et inférieure**. Cette constatation peut s'expliquer par les caractéristiques principales du bassin de la Meuse : la partie supérieure et la partie inférieure du bassin se caractérisent toutes deux par des plaines inondables relativement vastes offrant une grande capacité de stockage tandis que dans la partie centrale, les vallées sont plus pentues et étroites, ce qui se traduit par une capacité de stockage réduite des plaines inondables. En conséquence, les niveaux d'eau devraient en effet montrer une plus grande sensibilité dans la partie centrale du bassin.

De plus, la simulation a fait ressortir dans quelle mesure **certains tronçons sont susceptibles d'être gravement affectés par le changement climatique en termes d'augmentation des zones inondées**. C'est notamment le cas du tronçon entre Andenne et Monsin en Wallonie.

Des conséquences potentiellement significatives au niveau des points d'intérêts

L'analyse des points d'intérêts sélectionnés dans les différents pays a aussi révélé les faits suivants :

- Même si les inondations s'étendent sur une surface limitée, elles peuvent avoir de graves répercussions si elles atteignent des infrastructures clés, par exemple en France.
- Bien que certains sites semblent être bien préparés et protégés contre les inondations historiques, notamment en Wallonie, ils pourraient subir de plus gros dommages si l'on considère une augmentation du débit sous l'effet du changement climatique.

Titre	Modélisation hydraulique de la Meuse Rapport WP1 - Action 6
Auteurs	Detrembleur S., Dewals B., Fournier M., Becker B., Guilmin E., Moeskops S., Kufeld M., Archambeau P., de KeizerKeizer O., Pontegnie D., Huber N.P., Vanneuille W., Buiteveld H., Schüttrumpf H. et Piroton M.
Date	31-03-2011
Partenaire chef de file	EPAMA
Partenaires participants	ULg-HACH, EPAMA, RWTH, RWS, FHR
Work Package	1
Action	6

AMICE Adaptation of the Meuse to the Impacts of Climate Evolutions (Adaptation de la Meuse aux impacts des évolutions du climat)

est un projet du programme INTERREG IVB pour l'Europe du Nord-Ouest (numéro 074C).

Le changement climatique exerce un impact sur le bassin de la Meuse, en engendrant plus d'inondations et plus de sécheresses. Les experts et les gestionnaires de l'eau de 4 pays du bassin versant se sont associés dans le cadre de ce projet transnational financé par l'UE afin d'élaborer une stratégie d'adaptation innovante et durable. Le projet s'étend de 2009 à 2012.

Pour de plus amples informations sur le projet, veuillez visiter le site internet : www.amice-project.eu

Le Programme INTERREG IV B Europe du Nord-Ouest

Le Programme finance des actions transnationales innovantes qui conduisent à une meilleure gestion des ressources naturelles et des risques, à l'amélioration des moyens de communication et au renforcement des communautés en Europe du Nord-Ouest.

Pour de plus amples informations sur le programme, veuillez visiter : www.nweurope.eu

