



HAL
open science

Quels scénarios de débordement de l'Ourthe (Belgique) en réponse à une variabilité climatique long terme ?

Benjamin Grelier, Pierre Archambeau, Michel Piroton, Gilles Drogue

► To cite this version:

Benjamin Grelier, Pierre Archambeau, Michel Piroton, Gilles Drogue. Quels scénarios de débordement de l'Ourthe (Belgique) en réponse à une variabilité climatique long terme ?. *Physio-Géo - Géographie Physique et Environnement*, 2019, 13, pp.25-51. 10.4000/physio-geo.7423 . hal-02108841

HAL Id: hal-02108841

<https://hal.science/hal-02108841v1>

Submitted on 20 Apr 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Physio-Géo

Géographie physique et environnement

Volume 13 | 2019

Varia 2019

Quels scénarios de débordement de l'Ourthe (Belgique) en réponse à une variabilité climatique long terme ?

What scenarios of overflowing for the Ourthe river (Belgium) in response to long term climate variability?

Benjamin Grelier, Pierre Archambeau, Michel Piroton et Gilles Drogue



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/physio-geo/7423>

DOI : 10.4000/physio-geo.7423

ISBN : 978-2-8218-0427-2

ISSN : 1958-573X

Éditeur

Claude Martin

Édition imprimée

Pagination : 25-51

Référence électronique

Benjamin Grelier, Pierre Archambeau, Michel Piroton et Gilles Drogue, « Quels scénarios de débordement de l'Ourthe (Belgique) en réponse à une variabilité climatique long terme ? », *Physio-Géo* [En ligne], Volume 13 | 2019, mis en ligne le 13 avril 2019, consulté le 04 février 2020. URL : <http://journals.openedition.org/physio-geo/7423> ; DOI : 10.4000/physio-geo.7423



Les contenus de *Physio-Géo - Géographie Physique et Environnement* sont mis à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.

QUELS SCÉNARIOS DE DÉBORDEMENT DE L'OURTHE (BELGIQUE) EN RÉPONSE À UNE VARIABILITÉ CLIMATIQUE LONG TERME ?

Benjamin GRELIER⁽¹⁾, Pierre ARCHAMBEAU⁽²⁾,
Michel PIROTON⁽²⁾ et Gilles DROGUE⁽¹⁾

(1) : LOTERR, Université de Lorraine, Île du Saulcy, 57045 METZ cedex 01.

Courriels : benjamin.grelier@protonmail.com ; gilles.drogue@univ-lorraine.fr

(2) : HECE, Université de Liège, Quartier Polytech 1, Allée de la Découverte, 9, 4000 LIÈGE, BELGIQUE.

Courriels : pierre.archambeau@uliege.be ; michel.piroton@uliege.be

RÉSUMÉ : Cet article propose une quantification/qualification des impacts d'un climat en évolution sur les débordements d'un tronçon de l'Ourthe (Belgique), à partir d'un jeu de scénarios hydro-climatiques intégrant la variabilité long terme du climat (du Minimum de Maunder jusqu'à la fin du XXI^{ème} siècle). À l'aide de la modélisation hydraulique 1D (modèle WOLF 1D), un débit débordant est identifié le long du tronçon. Puis l'analyse débit-durée-fréquence est utilisée pour intégrer la dynamique de crue (durée de débordement) dans l'étude d'impact. En comparant un scénario de référence correspondant au climat actuel (1976-2005) à notre jeu de scénarios hydro-climatiques, les changements en durée et fréquence dans les débordements sont analysés. Il ressort de cette analyse que dans un contexte de variabilité climatique long terme, les débordements courts sont en majorité moins fréquents, tandis que les débordements longs sont en majorité plus fréquents. Les résultats de cette étude sont utiles aux gestionnaires du risque d'inondation qui souhaitent apporter de la "résilience climatique" aux aménagements des cours d'eau destinés à gérer les débordements.

MOTS-CLÉS : hydrologie, variabilité climatique, débordement de cours d'eau, modélisation hydraulique, débit débordant, analyse débit-durée-fréquence, Ourthe.

ABSTRACT : What scenarios of overflowing for the Ourthe river (Belgium) in response to long term climate variability?

This paper proposes an approach of climate change impacts assessment on overflow of an Ourthe river reach (Belgium). We based our work on a set of hydro-climatic scenarios including the long-term climate variability (from the Maunder Minimum to the end of the 21st century). A 1D hydraulic modelling (the WOLF 1D model) is then useful to detect an overflowing discharge along the reach, and a discharge-duration-frequency analysis was implemented to consider the flood dynamic (duration of overflow) in the impact study. From comparison between baseline data (1976-2005) corresponding to present climate to hydro-climate scenarios, impacts on overflow characteristics (duration and frequency) are analyzed. Results show that in a context of changing climate conditions, frequency of short overflow events decrease whereas that of long overflow events increase. The results of this study are useful to flood risk managers who aim to add "climatic resilience" to river planning measures.

KEY-WORDS : hydrology, climate variability, river overflow, hydraulic modelling, discharge-duration-frequency analysis, Ourthe.

I - INTRODUCTION

Le phénomène du changement climatique apporte une nouvelle donne dans l'étude du risque inondation. Dans le cas du bassin transnational de la Meuse, B. DEWALS et M. FOURNIER (2013) ont clairement mis en avant les problématiques soulevées par un climat en

évolution et ses effets hydrologiques, qui concernent entre autres les inondations (*cf.* projet AMICE, <http://www.amice-project.eu/fr/>). Certains auteurs (par exemple, E. GIRON, 2009) indiquent, en effet, que les inondations pourraient être plus fortes et plus fréquentes au cours de ce siècle en Belgique sous l'effet d'un réchauffement climatique rapide d'origine anthropique. Il ressort de ces travaux la nécessité de pouvoir quantifier/qualifier les impacts potentiels produits par un climat en évolution pour mieux prendre en compte la variabilité du climat dans les études d'impact et les solutions d'aménagement qui en découlent. C'est précisément ce à quoi nous contribuons dans cet article.

Prenant comme terrain d'étude la rivière Ourthe en Belgique, qui appartient au bassin transnational de la Meuse, nous cherchons à estimer l'évolution des débordements de cette rivière induits par la variabilité climatique long terme, dans le prolongement des travaux de B. GRELIER *et al.* (2016) et B. GRELIER (2017). En particulier, à partir d'un large spectre de scénarios climatiques, nous proposons une chaîne de modélisation (hydrologie, hydraulique) et de traitements (analyses du débordement et approche débit-durée-fréquence), pour évaluer, le long d'un tronçon de l'Ourthe, les impacts potentiels du changement climatique sur les débits de débordement.

II - CADRE D'ÉTUDE

1) Positionnement de l'étude

a. Étude d'impact du changement climatique

Face à l'évidence du réchauffement climatique et des changements globaux, il est nécessaire de retranscrire à une échelle sous-régionale, voire locale, les changements climatiques simulés à une large échelle par les modèles de circulation générale (MCG). Ces informations sont capitales pour les décideurs locaux, afin d'éclairer leurs choix d'aménagement territorial, suivant différents scénarios d'évolution socio-économique (RCP, *Representative Concentration Pathway*). Notre étude s'inscrit, ainsi, dans la lignée des nombreuses études d'impact du changement climatique, en particulier sur l'hydrologie de bassin (C. PRUDHOMME *et al.*, 2010 ; H. MADSEN *et al.*, 2014 ; L. TERRAY et J. BOÉ, 2013 ; G. DAYON, 2015). Dans le bassin transnational de la Meuse (parties française et belge), plusieurs études ont été portées dans ce champ de recherche, notamment en ce qui concerne les hautes eaux (T. DRIESSEN *et al.*, 2010 ; G. DROGUE *et al.*, 2010 ; S. DETREMBLEUR *et al.*, 2015). Nous avons souhaité poursuivre dans cette voie sur le même bassin, mais en proposant des éléments novateurs en matière d'étude d'impact.

Les études d'impact portant sur les inondations se rapportent souvent à des événements exceptionnels : en France, par exemple, les plans de prévention du risque d'inondation (PPRi) considèrent comme référence le débit des plus hautes eaux connues ou le débit de période de retour de 100 ans. S. ERPICUM *et al.* (2007) ont montré, dans le bassin de l'Ourthe, que pour se protéger de tels événements, des barrages-réservoirs très importants seraient nécessaires. Beaucoup d'éléments s'opposent à leur réalisation : le coût bien sûr, la technique, mais aussi les réticences de la société à en supporter les impacts, paysagers ou même sécuritaires (dans l'hypothèse d'une rupture des ouvrages). Faute de ces aménagements, il faut composer avec les débordements, lesquels peuvent se produire pour des débits relativement fréquents.

Les inondations sont souvent investiguées *via* la modélisation hydraulique, en testant un débit stationnaire correspondant à un débit caractéristique, de projet ou historique (S. ERPICUM *et al.*, 2010 ; S. DETREMBLEUR *et al.*, 2015 ; C. REBOLHO *et al.*, 2018). Pour envisager

une inondation sous un aspect dynamique (temps de submersion, dynamique de crue), certains auteurs simulent un événement complet (modélisation instationnaire). Si ces informations sont capitales, elles ne se réfèrent qu'à un nombre réduit d'événements. Il peut donc être judicieux d'apprécier la "représentativité statistique" des inondations par l'étude hydraulique de longues chroniques de débit. Les inondations peuvent alors être appréhendées sous un angle statistique et fréquentiel.

Partant de ces constats, nous aborderons notre étude sous l'angle des "petites" inondations, en intégrant l'aspect dynamique du débordement (comme variable révélatrice d'une inondation) et sa dimension statistique (fréquentielle). Couplée à une étude d'impact de la variabilité climatique long terme, cette approche produit des résultats inédits qui sont un premier pas vers une aide à la décision du risque inondation dans un contexte de changement climatique rapide.

b. Approche robuste *versus* approche optimale

Les futurs du climat, exprimés généralement par des projections à long terme, sont entachés par de larges incertitudes (R.L. WILBY et S. DESSAI, 2010). Face à celles-ci, les décideurs locaux peuvent céder à l'inaction (C. BROWN et R.L. WILBY, 2012), estimant que le risque de se tromper est trop élevé du fait de mesures d'adaptation inappropriées. De plus, une grande part des études d'impact du changement climatique ne considère qu'un nombre réduit de projections climatiques, omettant, de fait, des futurs climatiques potentiels ou des répliques du climat passé.

Pour pallier cette limite, des approches innovantes ont été développées, parmi lesquelles la méthode "conique" (Fig. 1). Conceptualisée par M.D. WAAGE et L. KAATZ (2011), cette approche prospective considère un grand nombre de scénarios climatiques sortant de la variabilité climatique observée. Sur la base de ce paradigme, une stratégie d'adaptation peut être élaborée dans l'objectif de répondre à un large panel de scénarios. Une telle stratégie d'adaptation, plutôt que d'être optimale, en ne s'ajustant qu'au scénario le plus probable du changement climatique, revêt un caractère robuste, en répondant efficacement à des scénarios très contrastés.

Suivant ce positionnement, notre démarche a consisté à suivre une approche ensembliste (mutli-MCG, multi-RCP) pour le futur, à l'exemple de A. ULLMANN *et al.* (2013), H. TABARI *et al.* (2015). Mais il nous a aussi semblé intéressant d'inclure dans le "cône de la variabilité potentielle" (Fig. 1) la variabilité climatique passée, comme le suggèrent J. SMITH *et al.* (2007) et D. CŒUR et M. LANG (2018). Le climat passé possède, en effet, des attributs qui le distinguent du climat présent et qui sont riches d'informations pour l'analyse des extrêmes. De plus, il n'est pas totalement exclu d'en connaître des répliques dans le futur. Dans cette optique, nous avons tenté de reconstituer la variabilité paléoclimatique (depuis 1659), en nous aidant des travaux de J. LUTERBACHER *et al.* (2002). Nous avons ainsi établi un large jeu de scénarios climatiques "potentiels", représentatif d'un climat en évolution sur la période pré-industrielle récente, la période contemporaine et la période future.

2) Choix méthodologiques et organisation générale de l'étude

L'objectif général est d'évaluer l'impact d'un jeu de scénarios climatiques long terme sur le débordement de rivière. La figure 2 illustre l'enchaînement des étapes mises en œuvre.

Nous souhaitons appréhender le débordement de rivière par le biais d'un débit de débordement (débit au delà duquel la rivière déborde – Fig. 2, en e). Cela permet d'employer l'analyse fréquentielle (AF) de type QdF (débit-durée-fréquence – Fig. 2, en f), qui nous

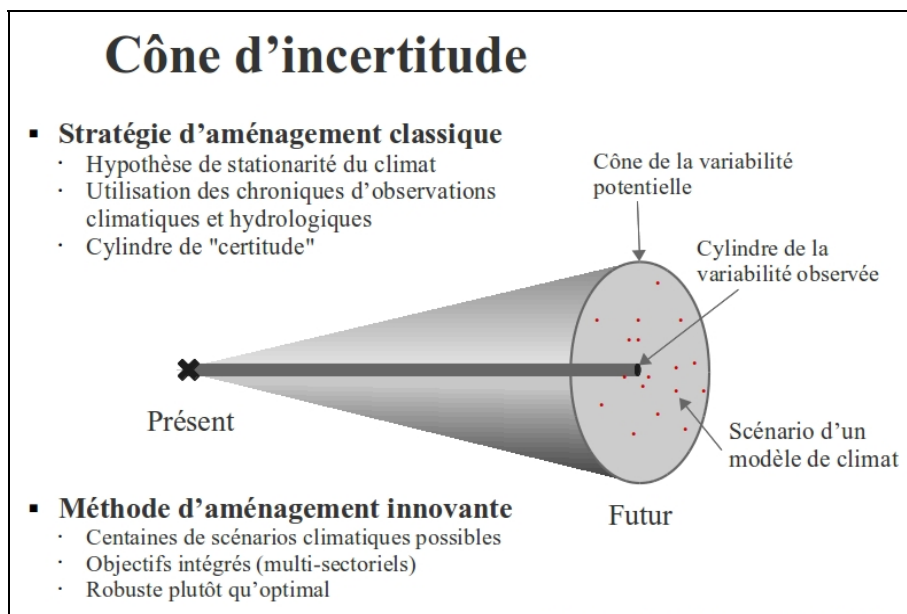


Figure 1 - Illustration conceptuelle de l'approche "conique" de l'aménagement en comparaison de l'approche "cylindrique".

Figure adaptée de M.D. WAAGE et L. KAATZ (2011).

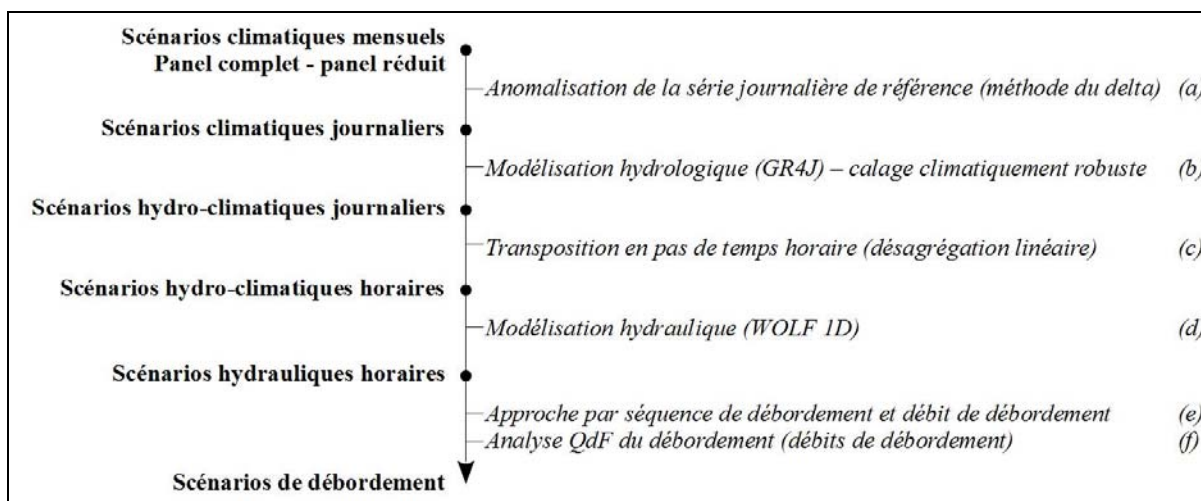


Figure 2 - Organisation générale de l'étude.

semble adéquate pour plusieurs raisons : 1/ l'AF est utile pour analyser de longues chroniques (situation de référence et plusieurs scénarios climatiques d'une durée de 30 ans, cette durée ayant été retenue car souvent utilisée pour le calcul des normales climatiques et hydrologiques) ; 2/ l'analyse fréquentielle est pertinente pour caractériser des débits caractéristiques (dont les débits inondants) ; 3/ contrairement à l'analyse fréquentielle "classique", l'approche intègre la notion de durée et permet donc de prendre en compte la dynamique de crue (G. GALÉA et C. PRUDHOMME, 1997 ; É. SAUQUET *et al.*, 2003) ; 4/ plusieurs débits caractéristiques différents peuvent être considérés (par exemple les débits inondants sur des durées différentes).

L'emploi de l'analyse QdF implique de travailler en variable finale sur des débits plutôt que des tirants d'eau. Une approche a donc été mise en place pour transférer une information de débordement, obtenue par analyse des résultats de modélisations hydrauliques (Fig. 2, en d), à une information de débit (Fig. 2, en e). Un modèle bi-dimensionnel (2D) permettrait une représentation précise des écoulements, que ce soit dans le lit mineur de la rivière ou dans la plaine inondable (échanges entre lits, répartition du débit, recirculations, *etc.*). Toutefois, pour des raisons de temps de calcul CPU, c'est un modèle uni-dimensionnel (1D) qui a été retenu. En effet, seule la modélisation 1D permet de simuler dans un temps raisonnable (2,5 jours par scénario environ) les longues chroniques des scénarios climatiques nécessaires pour retranscrire la dynamique hydrologique dans les scénarios hydrauliques en régime instationnaire. Or c'est à partir des simulations hydrauliques que sont extraites des informations sur la durée de débordement, variable qui nous semble capitale pour la compréhension et la gestion des inondations dans un territoire. Pour la même raison de temps de calcul, la modélisation 1D permet de s'intéresser à un long tronçon de rivière, comme nous souhaitons le faire.

Les données d'entrée du modèle hydraulique proviennent de la modélisation hydrologique des scénarios climatiques journaliers (Fig. 2, en b). Comme nous souhaitons simuler des scénarios climatiques "non jaugés" (pour lesquels on ne connaît pas la réponse en débit du bassin), nous avons écarté l'emploi d'un calage "classique". La modélisation hydrologique a été précédée d'une procédure de calage climatiquement robuste. Plusieurs auteurs ont en effet montré le manque de robustesse des modèles hydrologiques dans un contexte de climat non stationnaire (P. BRIGODE *et al.*, 2013 ; G. SEILLER *et al.*, 2013 ; S. WESTRA *et al.*, 2014). Le modèle hydrologique utilisé (GR4J) a été forcé par des scénarios climatiques, disponibles initialement sous la forme d'anomalies de précipitations et de températures mensuelles. Celles-ci ont été appliquées au pas de temps journalier, par la méthode du delta (Fig. 2, en a), afin de produire des chroniques climatiques. Le très large panel des scénarios climatiques disponibles (panel complet) a été réduit, pour des raisons computationnelles, *via* une procédure de *clustering*. Celle-ci permet de ne pas trop perdre en représentativité.

Dans un mode instationnaire et avec le débordement comme objet d'étude, il est pertinent d'utiliser le pas de temps horaire dans la modélisation hydraulique : un débordement inférieur à 24 heures peut être dommageable et doit donc être identifié. Dans cette optique, une désagrégation linéaire a été appliquée aux débits journaliers. Ce choix est objectivement discutable, la retranscription parfaite de la dynamique horaire étant irréaliste. Néanmoins, grâce à cette technique, la dynamique temporelle des débits est plus fine, et la distribution est conservée (hormis pour les pics de crue dont les valeurs maximales restent inchangées). Cela permet l'affinement des sorties du modèle hydraulique (horaire au lieu de journalier). L'information obtenue est de toute façon meilleure (plus proche de la "réalité") qu'une information journalière distribuée par palier constant à l'échelle horaire dans le modèle hydraulique.

III - TERRAIN D'ÉTUDE

1) Le bassin de l'Ourthe à Tabreux

Le bassin de l'Ourthe à Tabreux (Fig. 3) est un bassin de taille moyenne (1607 km²) à dominante forestière. Il est situé dans les Ardennes, au sud-est de la Belgique (Fig. 3, en a). L'Ourthe à Tabreux résulte de la confluence de l'Ourthe occidentale et de l'Ourthe orientale à

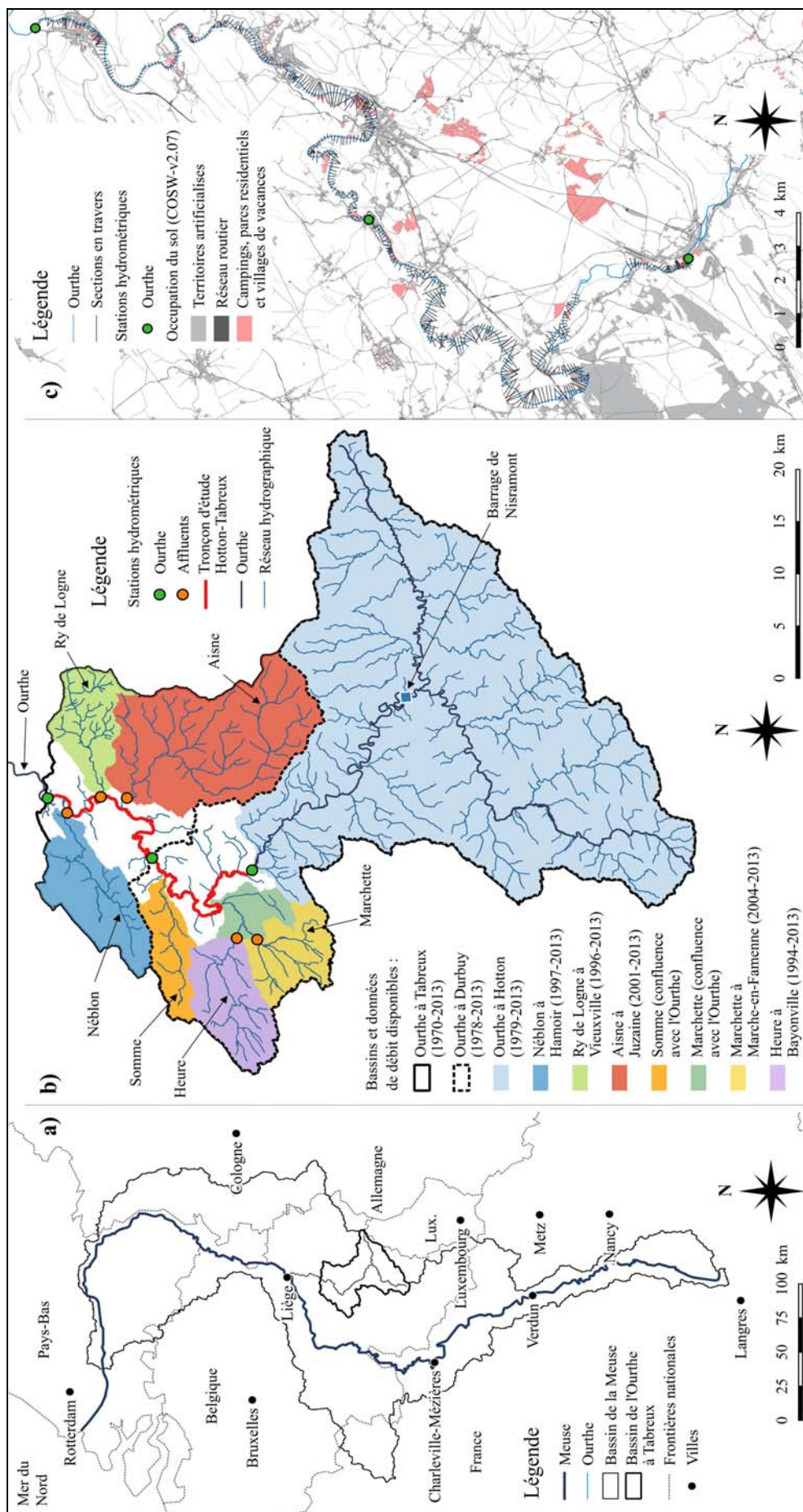


Figure 3 - Présentation du terrain d'étude.

a : localisation du bassin de l'Ourthe à Tabreux dans le bassin de la Meuse. b : sous-bassins de l'Ourthe à Tabreux et localisation des stations hydrométriques. c : emplacement des sections en travers utilisées dans le modèle hydraulique.

Nisramont où se situe un barrage-réservoir entré en service en 1958 (Figure 3-b). Celui-ci influence peu le régime hydrologique de l'Ourthe à Tabreux (B. DEWALS *et al.*, 2017).

À Liège, son exutoire, l'Ourthe contribue significativement aux écoulements de crue de la Meuse, les sols étant peu profonds et les pentes fortes dans la partie amont du bassin versant (M. DE WIT *et al.*, 2007). Le régime hydrologique est de type pluvial avec des hautes eaux d'hiver (maximum en février) et des basses eaux d'été (minimum en août). Le cours d'eau a une forte réactivité, même si, au total, l'essentiel des eaux écoulées est lié à l'écoulement de base : l'indice d'écoulement de base (IEB = écoulement de base / écoulement total – A. GUSTARD et S. DEMUTH, 2009), est de 0,575. L'influence nivale est toujours faible, en particulier sur les écoulements de crue (T. DE BOER-EUSER *et al.*, 2017).

2) Le tronçon d'étude Hotton - Tabreux

Nous avons fait le choix de modéliser le tronçon de l'Ourthe entre Hotton et Tabreux (Fig. 3-b). Ce choix a été dicté par : la taille du tronçon, adéquate au regard des temps de simulation hydraulique ; une disponibilité de données topographiques, hydrologiques et hydrauliques (Fig. 3-c) ; la présence de deux stations hydrométriques fournissant les conditions limites amont et aval pour une simulation hydraulique bien posée ; l'existence avérée d'un risque d'inondation (*cf.* les crues de 1993, 1995, 2003 et 2011). D'après les données du Service Public de Wallonie sur le tronçon de l'Ourthe Hotton-Tabreux (<http://geoportail.wallonie.be/catalogue/69ec8ed1-5ebb-4934-9f14-1a6eb5b2ffba.html>), entre 465 et 3810 personnes seraient potentiellement en zone inondable dans le cas d'une inondation d'une période de retour de 25 ans. Ces chiffres augmentent, pour atteindre entre 2474 et 9960 personnes dans le cas d'un scénario extrême (supérieur à la crue centennale). Le risque inondation concerne également d'autres secteurs de l'économie (commerces, tourisme, infrastructures) et représente un enjeu local fort. La figure 3-c montre que de nombreux petits centres urbains et infrastructures sont présents le long du tronçon d'étude.

IV - CONSTRUCTION DES SCÉNARIOS

1) Variabilité climatique long terme et scénarios hydro-climatiques

a. Scénarios climatiques représentatifs

Le jeu complet de scénarios climatiques de départ comprend 2034 scénarios d'anomalies de précipitations et de températures mensuelles (B. GRELIER *et al.*, 2016 ; B. GRELIER, 2017). Ces scénarios expriment la variabilité climatique long terme du bassin de l'Ourthe depuis le Minimum de MAUNDER (vers 1650) jusqu'à la fin du XXI^{ème} siècle. Pour ce dernier, les scénarios climatiques sont établis à partir des simulations d'une sélection de 13 modèles de climat du 5^{ème} exercice CMIP5 - Coupled Model Intercomparison Project (suivant A. ULLMANN *et al.*, 2013) forcés avec les scénarios RCP4.5 (réchauffement moyen) et RCP8.5 (réchauffement intense). Un échantillonnage a été réalisé pour extraire les contrastes climatiques les plus forts contenus dans cet ensemble tout en conservant une représentativité du jeu initial de scénarios (B. GRELIER, 2017).

Les 13 scénarios représentatifs obtenus sont exposés sur la figure 4 (disques blancs avec bordures colorées). Ils sont globalement bien répartis dans la gamme des scénarios d'anomalies (en gris). Pour les précipitations, les anomalies mensuelles positives et négatives sont

plutôt bien représentées et en majorité situées entre -25 % et +25 %. Aucune saisonnalité des anomalies ne se dégage, constat qui vaut aussi pour les températures. Pour cette variable, la majorité des scénarios tend à privilégier l'hypothèse d'un climat plus chaud que l'actuel avec une hausse de température pouvant atteindre 3 à 4 °C à l'échelle mensuelle comme à l'échelle annuelle. Ces anomalies restituent une grande diversité de conditions climatiques, ce qui correspond bien à notre objectif initial de robustesse.

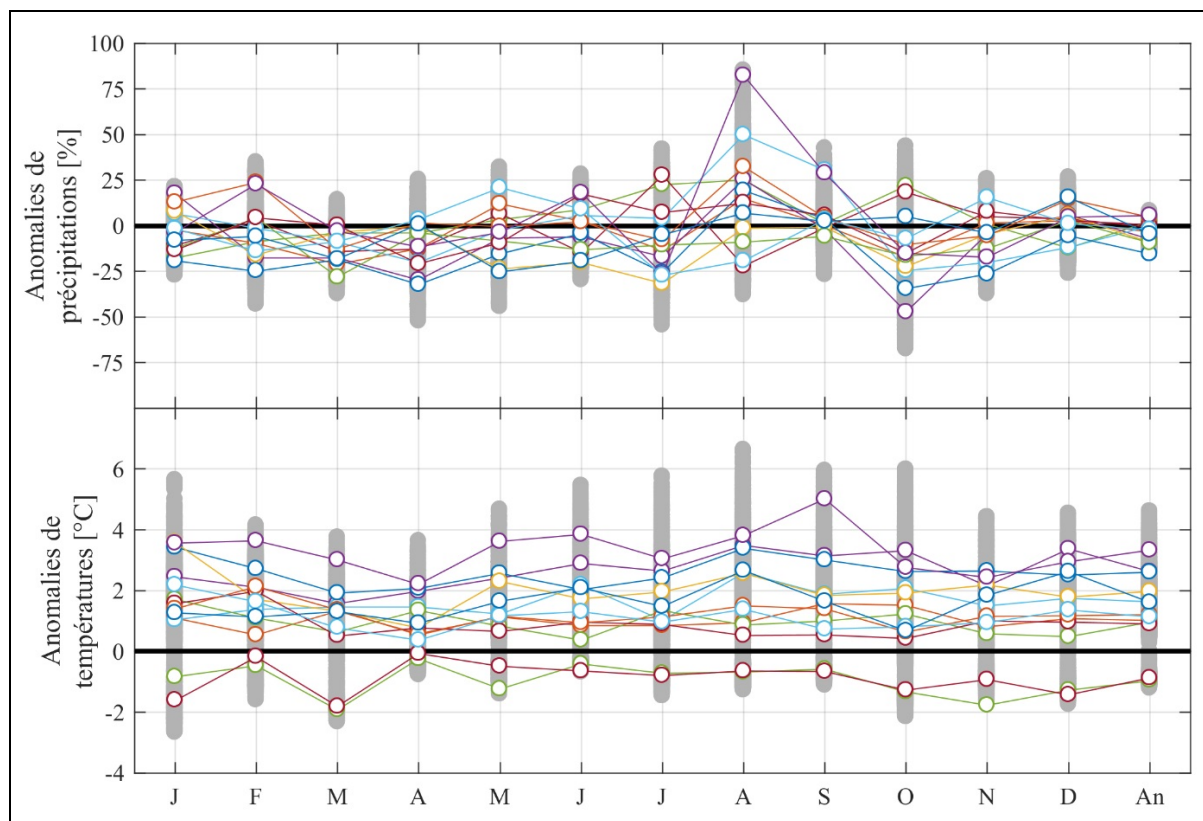


Figure 4 - Synthèse du jeu complet de scénarios climatiques (en gris) et des 13 scénarios représentatifs des anomalies de précipitations et températures (en couleur).

Les scénarios d'anomalies mensuelles sont convertis ensuite en scénarios climatiques par la méthode du delta, dite aussi méthode des anomalies. Cette méthode permet de passer du pas de temps mensuel au pas de temps journalier, où s'exprime la dynamique des débits : à chaque valeur journalière de la série climatique de référence (1976-2005) représentant le climat actuel du bassin de l'Ourthe, est appliquée l'anomalie (additive pour les températures, multiplicative pour les précipitations) du mois correspondant (Fig. 5). Cette méthode, un peu naïve, ne modifie pas la structure temporelle de la série climatique de référence (par exemple, le nombre de jours pluvieux pour la série de précipitations), mais uniquement son amplitude. Il s'agit, certes, d'une limite importante, mais la structure temporelle des séries est très mal simulée dans les modèles de climat, ce qui rend très incertaine l'estimation du changement de variance lié au changement climatique d'origine anthropique (C. PRUDHOMME *et al.*, 2010).

b. Scénarios hydro-climatiques

À partir de ces chroniques journalières, des scénarios hydro-climatiques ont été calculés à l'aide du modèle conceptuel pluie-débit GR4J (*cf.* C. PERRIN *et al.*, 2003). Le calage a bénéf-

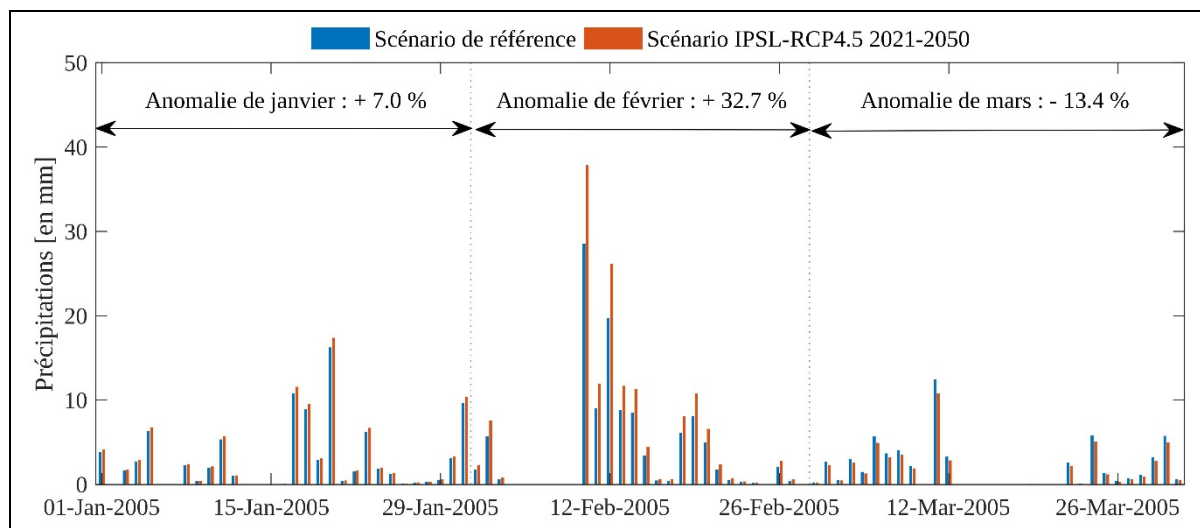


Figure 5 - Perturbation de la série de référence par la méthode du delta : exemple des hauteurs quotidiennes de précipitation de janvier à mars 2005 perturbées à partir des anomalies mensuelles du scénario climatique futur IPSL-RCP4.5 2021-2050.

ficié des séries d'observation disponibles sur la période 1971-2013 pour les précipitations et les températures journalières (Institut Royal Météorologique de Belgique – IRM) et pour les débits (Service d'Études Hydrologiques, SETHY, du Service Public de Wallonie, SPW). Les températures ont servi au calcul de l'ETP par la formule de L. OUDIN *et al.* (2005).

Nous avons opté pour un calage climatiquement robuste, basé sur la sélection de périodes climatiquement contrastées dans la série de référence, identifiées à partir de l'indice d'aridité ($IA = ETP \text{ annuelle} / \text{précipitations annuelles}$), suivant la méthode de P. BRIGODE *et al.* (2013). Sur la période 1971-2013, trois périodes climatiques de 5 ans sont identifiées : "humide" (septembre 1997 - août 2002), "intermédiaire" (septembre 2003 - août 2008) et "sèche" (septembre 1971 - août 1976). Sur chacune d'elle est réalisé un calage de GR4J, duquel est issu un jeu de paramètres optimal. La performance du modèle est évaluée avec le critère du KGE de Gupta (H.V. GUPTA *et al.*, 2009). Dans notre cas, les critères sont de 0,94 (période sèche), 0,95 (période humide) et 0,94 (période intermédiaire), ce qui traduit la très bonne capacité du modèle à reproduire la dynamique des débits de crue dans des périodes climatiquement contrastés (B. GRELIER, 2017).

Pour les calculs de débits en extrapolation, le calcul de l'indice d'aridité est appliqué aux scénarios climatiques représentatifs (B. GRELIER, 2017). Le débit journalier est simulé en prescrivant à GR4J le jeu de paramètres de GR4J ("sec", "intermédiaire" ou "humide") correspondant à la valeur de l'IA. Si la valeur de l'IA sort de la gamme de variabilité définie pour le climat actuel, c'est le jeu de paramètres correspondant à l'IA le plus proche qui est appliqué.

2) Modélisation hydraulique

a. Modèle hydraulique WOLF 1D

Le modèle WOLF 1D appartient à la suite logicielle WOLF développée au HECE (Hydraulics in Environmental and Civil Engineering - Université de Liège – M. PIROTTON *et al.*, 2004). Il s'agit d'un modèle unidimensionnel, structuré en lits composés : la discrétisation spatiale utilise la technique des volumes finis. Le tronçon est ainsi découpé en mailles

(ou segments) de 50 mètres de long (Fig. 6). Des relations géométriques propres sont utilisées à partir des sections en travers pour définir les caractéristiques de chaque maille (altitude, relations volumiques). Les transferts de masse et de quantité de mouvement se réalisent au travers des bords de mailles, résolvant les équations classiques de SAINT-VENANT.

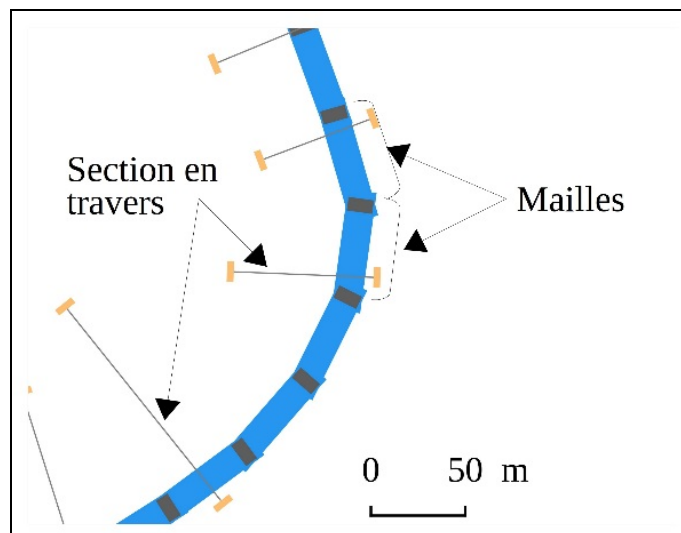


Figure 6 - Extrait du tronçon découpé en mailles et positionnement des sections en travers.

En condition d'écoulement infracritique, un problème bien posé nécessite une condition aux limites amont et une condition aux limites aval. Des sections en travers et le vecteur de la rivière se chargent de la représentation du terrain. Dans le cas du tronçon Hotton-Tabreux, nous disposons de 545 sections en travers pour une longueur de tronçon de près de 47 km (voir Fig. 3-c). À l'exception d'une partie du tronçon de 2,5 km pour lequel aucune section en travers n'est disponible (un peu en aval de Hotton), pour le reste du tronçon la densité est d'en moyenne 12 sections en travers par km. En régime instationnaire, le modèle fournit en sortie, pour chaque maille (ou segment de tronçon) et chaque pas de temps, une valeur de débit et de hauteur d'eau.

b. Conditions limites amont

Les données de débit utilisées (données SPW) comme conditions limites amont sont localisées et précisées sur la figure 3-b. Préalablement au calage de WOLF 1D, il a fallu pallier l'absence complète de mesures sur certains bassins affluents (*cf.* B. GRELIER, 2017, pour des précisions). Pour l'Ourthe à Hotton, comme indiqué au paragraphe II-2, le modèle GR4J a été calé par une procédure climatiquement robuste. En revanche, pour les stations des affluents, du fait de périodes disponibles insuffisantes, nous avons adopté une procédure de calage classique. Les résultats (non présentés ici, *cf.* B. GRELIER, 2017) témoignent d'une performance suffisante pour qu'ils soient utilisés dans la suite de l'étude. Les jeux de paramètres obtenus ont servi à modéliser les scénarios hydro-climatiques, les conditions limites amont étant établies pour les 13 scénarios climatiques et la période de référence.

c. Condition limite aval

La condition limite aval correspond à l'altitude de surface libre à la station hydrométrique

de Tabreux. Celle-ci a été établie par une transformation préalable des débits simulés par le modèle hydraulique (calibré sur les débits observés) en altitudes de surface libre observées. Nous avons procédé sur une période réduite à 2009-2014, qui couvre une très large gamme de débits, afin de réduire les temps de calcul. Les altitudes ont été obtenues en ajoutant l'altitude du zéro de l'échelle (111,38 m) à la hauteur d'eau mesurée à la station de Tabreux.

Une équation polynomiale de 2nd degré ajuste assez fidèlement ($R = 0,98$) les altitudes de surface libre observées avec les débits simulés et les débits observés (Fig. 7).

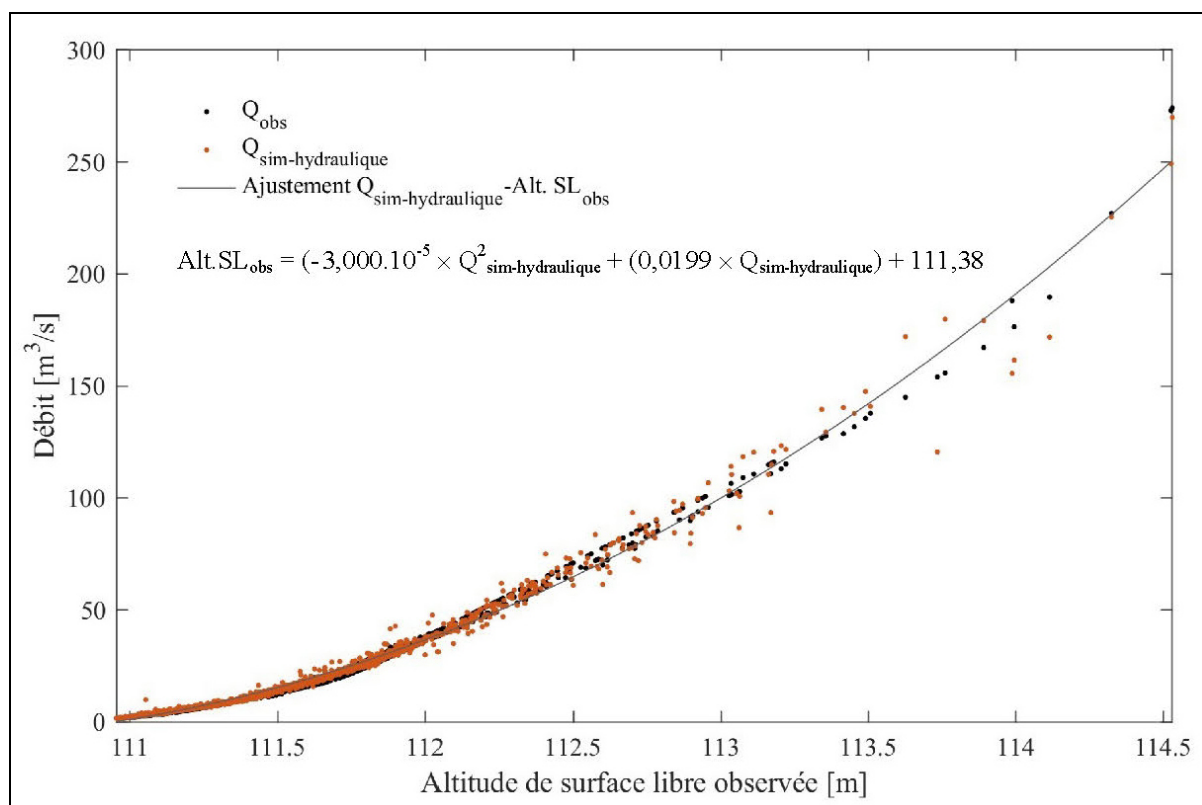


Figure 7 - Débits journaliers observés (Q_{obs}) et simulés par le modèle hydraulique ($Q_{sim-hydraulique}$) mis en relation avec l'altitude de la surface libre observée ($Alt.SL_{obs}$) sur la période septembre 2009 - août 2013.

d. Calage du modèle WOLF 1D

Le calage du modèle hydraulique s'effectue sur le seul paramètre de rugosité, exprimé par le coefficient de MANNING. Suivant G. DEGOUTTE (2001), la valeur du coefficient devrait être compris entre 0,020 (canal en terre enherbé) et 0,040 (lit majeur en prairie). Nous avons donc testé le modèle hydraulique sur la période 2004-2013 (période de disponibilité des données pour l'ensemble des conditions limites amont et aval) en utilisant différentes valeurs du paramètre de rugosité : 0,020 ; 0,025 ; 0,030 ; 0,032 ; 0,035 ; 0,040.

La figure 8 montre l'écart entre les altitudes de surface libre observées et simulées aux stations de Hotton, Durbuy et Tabreux (voir Fig. 3-b).

Dans le cas d'Hotton, aucune des configurations de rugosité ne permet d'obtenir un résultat satisfaisant. À ce sujet, bien que ne pouvant l'affirmer, nous faisons l'hypothèse que

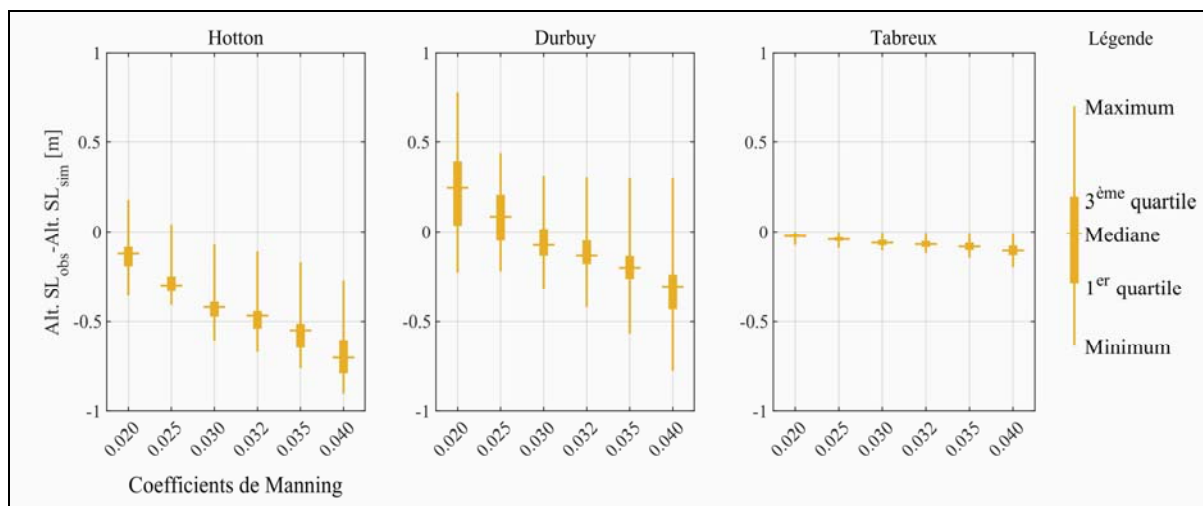


Figure 8 - Boîtes à moustaches des anomalies entre les altitudes de surface libre observées ($Alt.SL_{obs}$) et simulées ($Alt.SL_{sim}$) à Hotton, Durbuy et Tabreux pour différents coefficients de MANNING.

La comparaison est effectuée pour $Alt.SL_{obs} > 175$ m à Hotton, $Alt.SL_{obs} > 143,5$ m à Durbuy et $Alt.SL_{obs} > 111,5$ m à Tabreux. Période 2004-2013.

l'absence de sections en travers sur 2,5 km à l'aval d'Hotton (voir Fig. 3-c) doit être incriminée. En effet, la topographie calculée par le modèle hydraulique, par interpolation linéaire à partir des sections amont et aval, diffère sans doute de la réalité et peut donc conduire à ces résultats peu convaincants.

À Durbuy, assez clairement, c'est la configuration avec une valeur de rugosité de 0,030 qui est la mieux distribuée autour d'un écart nul et qui fournit les écarts les plus faibles.

Enfin, pour Tabreux, les anomalies sont très faibles pour l'ensemble des configurations, et tout particulièrement pour les plus faibles valeurs de rugosité.

Les comparaisons entre les débits observés et simulés (non présentés ici) privilégient, elles-aussi, le choix d'un coefficient de rugosité de 0,030. Cette valeur a donc été étendue à l'ensemble du modèle, en conservant cependant à l'esprit que les résultats concernant Hotton devront être considérés avec prudence.

À l'issue des étapes décrites précédemment, les 13 scénarios hydro-climatiques et la période de référence ont été simulés par WOLF 1D. En sortie, nous obtenons pour chacune des 945 mailles du modèle, les informations horaires de débit et d'altitude de surface libre sur une période de 30 ans.

V - MÉTHODE D'ANALYSE DU DÉBORDEMENT

1) Identification des débordements

a. Hauteur des bords de berge

Pour caractériser les débordements, les hauteurs des bords de berge ont été identifiées à partir des profils des sections en travers (545 sections). Concrètement, nous avons considéré

le point de rupture de pente entre le chenal d'écoulement et la plaine inondable (Fig. 9-b), en nous aidant de la représentation du MNT (Fig. 9-a). Ces informations ont été transcrites dans le modèle au niveau de chacune des 944 mailles.

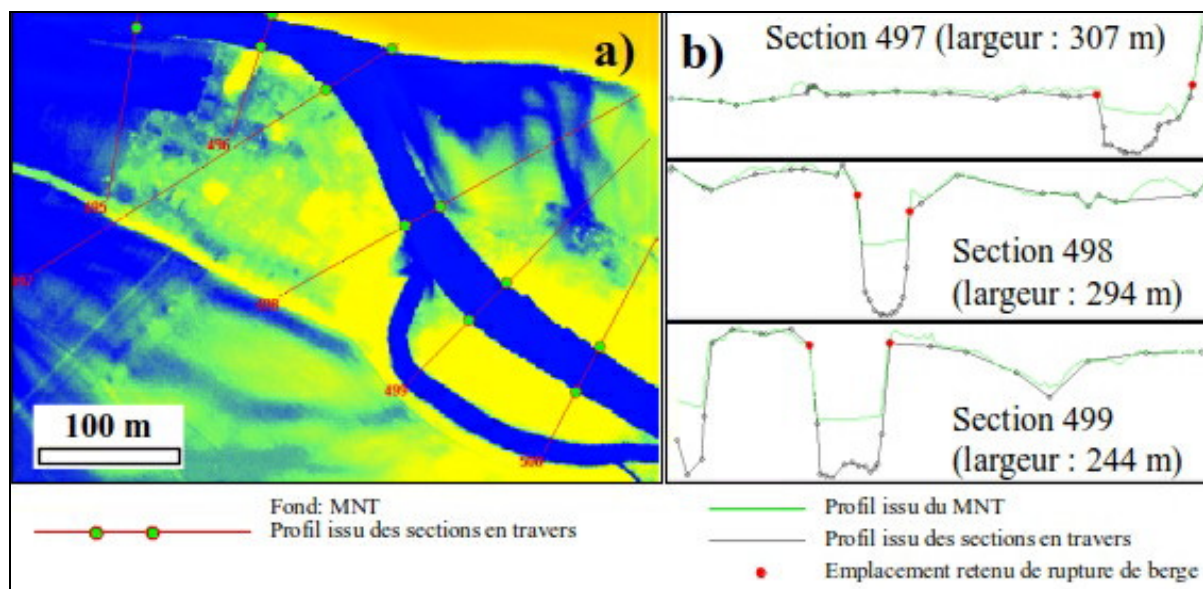


Figure 9 - Exemples d'identification visuelle des bords de berge en aval de Fronville.

a : sections en travers positionnées sur le MNT. b : profils des sections en travers.

b. Séquences de débordement d'un bloc

Pour un pas de temps, un débordement au niveau d'une maille est identifié par comparaison entre l'altitude de surface libre simulée et l'altitude du bord de berge atteint en premier (donc l'altitude la moins élevée entre les bords de berge de rives droite et gauche).

Afin de synthétiser l'information et l'analyse du débordement, et d'alléger les temps de calcul, l'analyse a été réalisée à l'échelle d'un bloc de mailles. Un bloc est défini comme 20 mailles consécutives. Le tronçon est donc découpé en 47 blocs de 1 km. On définit qu'un bloc déborde lorsqu'un débordement se produit sur un nombre donné de ses mailles. Nous avons opté pour un seuil à 5 mailles comme bon compromis pour qualifier le bloc de débordant.

La figure 10 illustre la procédure d'identification du débordement d'un bloc. Sur la moitié inférieure de la figure, la première ligne (isolée) symbolise un bloc, tandis que les 20 lignes solidaires représentent les 20 mailles du bloc. En abscisse est représenté le temps : une case correspond à une heure. Une case rouge symbolise un débordement. De cette manière, on peut représenter le débordement d'un bloc : dès que 5 mailles débordent, le bloc est qualifié de débordant. Partant de cette procédure, nous définissons une séquence de débordement (SD) comme une succession de pas de temps pour lesquels un bloc déborde (à noter que des SD de 1h sont possibles).

c. Relation débit-séquence de débordement

La figure 10 montre les séquences de débordement d'un bloc en regard d'une chronique de débits. Ces derniers correspondent aux débits du bloc, calculés comme la moyenne des débits de l'ensemble de ses 20 mailles. Cela permet, en accord avec la SD, de déterminer

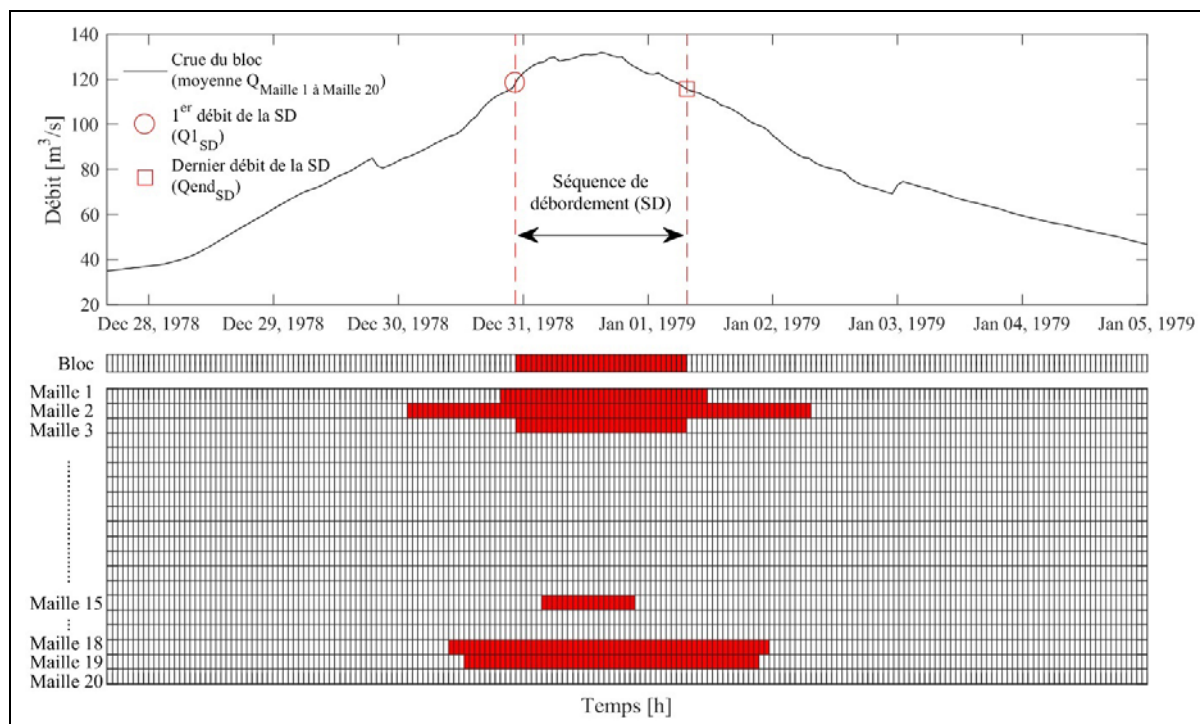


Figure 10 - Exemple d'identification d'une séquence de débordement à l'échelle d'un bloc.

notamment les valeurs des débits qui initient et clôturent chaque SD : le premier débit débordant d'une SD (Q_{1SD}) et le dernier débit débordant d'une SD (Q_{endSD}).

À propos de la sensibilité des valeurs de Q_{1SD} et Q_{endSD} à la présence d'une SD, la figure 11 apporte une réponse claire. Elle indique que la sensibilité du Q_{1SD} est très faible avec les données horaires (boîtes rouges) : toutes les SD sont initiées par un débit quasiment identique (à l'exception de quelques blocs à l'aval du tronçon, où l'étendue de la distribution, tout en restant modérée, peut atteindre $10 \text{ m}^3/\text{s}$, voire $25 \text{ m}^3/\text{s}$ pour le bloc au niveau de Tabreux). On remarque, en outre, l'intérêt des données horaires par rapport à des données moyennes journalières (boîtes noires), pour lesquelles la dispersion des valeurs de Q_{1SD} peut être très forte (supérieure à $50 \text{ m}^3/\text{s}$). Ce constat vaut aussi pour le Q_{endSD} (non présenté).

2) Analyse QdF

L'analyse QdF considère, dans un événement de crue, les périodes pour lesquelles des débits seuils sont continuellement dépassés. C'est une approche qui intègre la dynamique temporelle de l'écoulement. Ayant associé l'écoulement (débit) à un débordement (altitude de surface libre) dans la section précédente, c'est au dépassement du Q_{1SD} que nous nous intéressons ici.

a. Échantillonnage supseuil des événements de crue

Suivant les recommandations de M. LANG et J. LAVABRE (2007), nous avons retenu l'approche supseuil pour constituer nos séries de débits. Tous les événements indépendants sont considérés, au contraire de l'approche par les débits maximums annuels, qui peut occulter un certain nombre d'événements indépendants et significatifs.

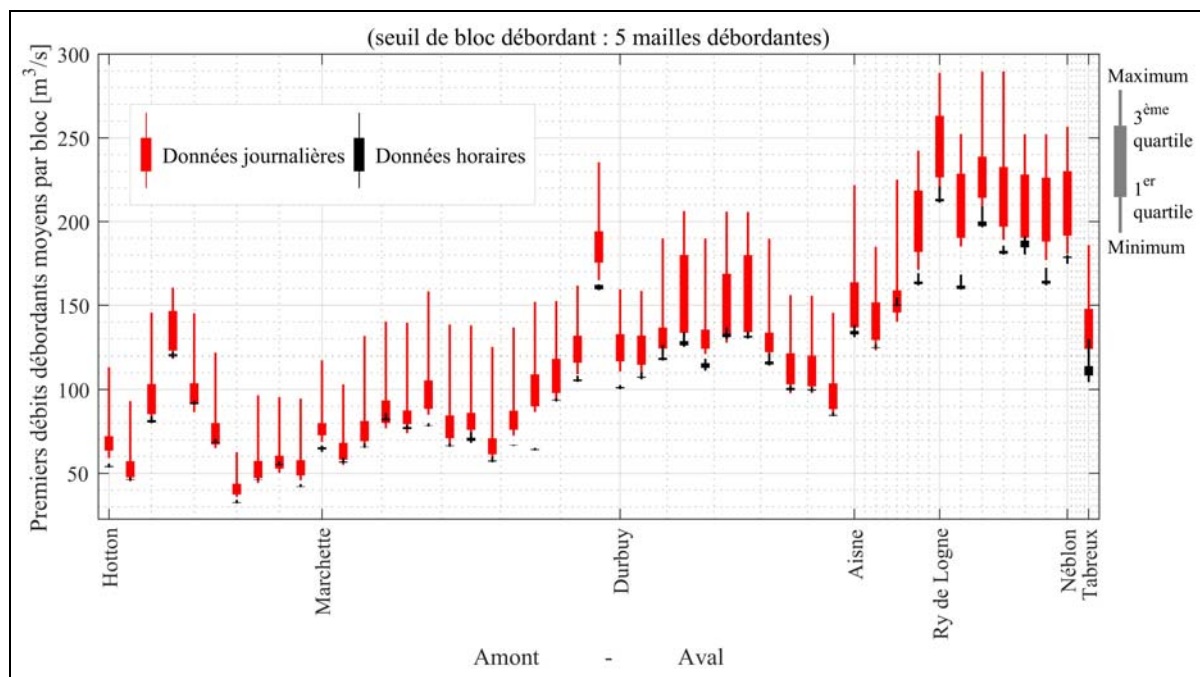


Figure 11 - Sensibilité du premier débit d'une séquence de débordement : pas de temps horaire versus pas de temps journalier.

Boîtes noires : données journalières. Boîtes rouges : données horaires.

Cette approche nécessite d'isoler des événements indépendants. Pour cela, M. LANG *et al.* (1999) proposent d'utiliser trois critères pour la sélection des événements : une valeur de débit seuil (S), une durée minimale (δ) et un critère de redescente de l'hydrogramme entre deux pics de crue (α). De cette manière, on évite d'intégrer dans la série finale deux crues dont la seconde serait (trop) influencée par les conditions hydrologiques de la première (saturation du bassin).

La procédure a été automatisée pour obtenir des séries offrant une moyenne de deux événements de crue par an (B. GRELIER, 2017). Les tests proposés par M. LANG et J. LAVABRE (2007) ont été réalisés afin de valider les choix opérés par la procédure. Cinq durées d'intégration (d) du débit continuellement dépassé ont été retenues : 1h, 12h, 1j, 2j et 5j. Pour chacune d'elle, ont été définies les valeurs de la durée minimale et du critère de redescente (Tab. I). Ces valeurs, établies pour le scénario de référence, sont considérées comme homogènes sur l'ensemble du tronçon (hypothèse de stationnarité). La procédure vise ensuite à construire une série d'événements indépendants pour chacun des 14 scénarios étudiés (celui de référence et les 13 scénarios hydro-climatiques), chacun des 47 blocs et chacune des 5 durées d'intégration, soit pour un total de 3290 séries. La très large majorité des séries construites donne une moyenne de 2 à 3 crues/an, en accord avec les valeurs préconisées par M. LANG *et al.* (1999) et P. JAVELLE (2001).

b. Analyse fréquentielle

L'analyse fréquentielle cherche à ajuster une loi de distribution sur un échantillon, de débits de crue dans notre cas. Dans le cas de l'analyse QdF, la démarche est réitérée autant de fois qu'il y a de durées d'intégration. Comme nous avons un grand nombre de séries à traiter (3290), il nous a semblé opportun de définir un seul type de loi de distribution à ajuster. Nous avons retenu la loi de PARETO généralisée, réputée bien adaptée pour les séries supseuil

Tableau I - Valeurs retenues des critères de sélection d'événements de crue indépendants pour les différents pas de temps.

Pas de temps	1h	12h	1j	2j	5j
S	98 m ³ /s	97 m ³ /s	94 m ³ /s	84 m ³ /s	62 m ³ /s
δ	110 h	110 h	110 h	115 h	250 h
α	0,3	0,3	0,3	0,3	0,5

(MIKE, 2017, méthode du maximum de vraisemblance). Le critère d'information d'AKAIKE (AIC) normalisé donne une information sur la performance de l'ajustement : plus il est faible, meilleur est l'ajustement. La figure 12 donne les exemples des ajustements avec les AIC normalisés minimum (Fig. 12-a), moyen (Fig. 12-b) et maximum (Fig. 12-c) parmi l'ensemble du jeu de données.

Pour de très faibles probabilités au non dépassement, les valeurs empiriques sortent parfois de l'intervalle de confiance de la distribution ajustée (95 % – Fig. 12-b et 12-c). À l'inverse, pour les probabilités au non dépassement plus élevées, correspondant à des crues plus fortes, la distribution empirique est relativement proche de la distribution ajustée. Des différences de débit, entre 10 m³/s (Fig. 12-a) et 40 m³/s (Fig. 12-c), se manifestent cependant pour des probabilités supérieures respectivement à 0,95 et 0,90. Les ajustements les plus fiables correspondent donc, en général, aux probabilités intermédiaires (0,10 à 0,90 – périodes de retour de 1,1 à 10 ans). Mais un grand nombre d'ajustements s'avèrent tout de même cohérents avec la distribution empirique pour des probabilités au non dépassement supérieures à 0,90.

c. Ajustements et $Q1_{SD}$

Pour près de 88 % des blocs, la valeur de $Q1_{SD}$ est située dans la fourchette des valeurs ajustées fiables (périodes de retour de 1,1 à 30 ans), ce qui valide notre choix de soumettre l'évolution des débordements (*via* les $Q1_{SD}$) aux changements climatiques potentiels par le biais de l'analyse QdF. Les autres 12,25 % de cas concernent des blocs qui possèdent une occurrence supérieure à 2,5 débordements par an. Ils sont tous situés dans la partie amont du tronçon et doivent donc être considérés avec précaution.

VI - IMPACTS DE LA VARIABILITE CLIMATIQUE LONG TERME SUR LES DÉBORDEMENTS

1) À l'échelle d'un bloc, l'exemple du bloc de Durbuy

a. Période de référence (climat actuel)

À titre d'exemple, la figure 13 présente, pour le bloc 23 (situé au niveau de Durbuy), les relations, fournies par les analyses QdF, entre le débit et la période de retour pour les cinq durées d'intégration considérées.

L'analyse QdF se révèle ici particulièrement pertinente. En tout cas, elle met bien en évidence, pour une même période de retour, les différences de débit en fonction de la durée d'intégration (Fig. 13). Ainsi, pour une période de retour de 20 ans, les débits estimés varient de 105 m³/s pour $d = 5j$ à 210 m³/s pour $d = 1h$.

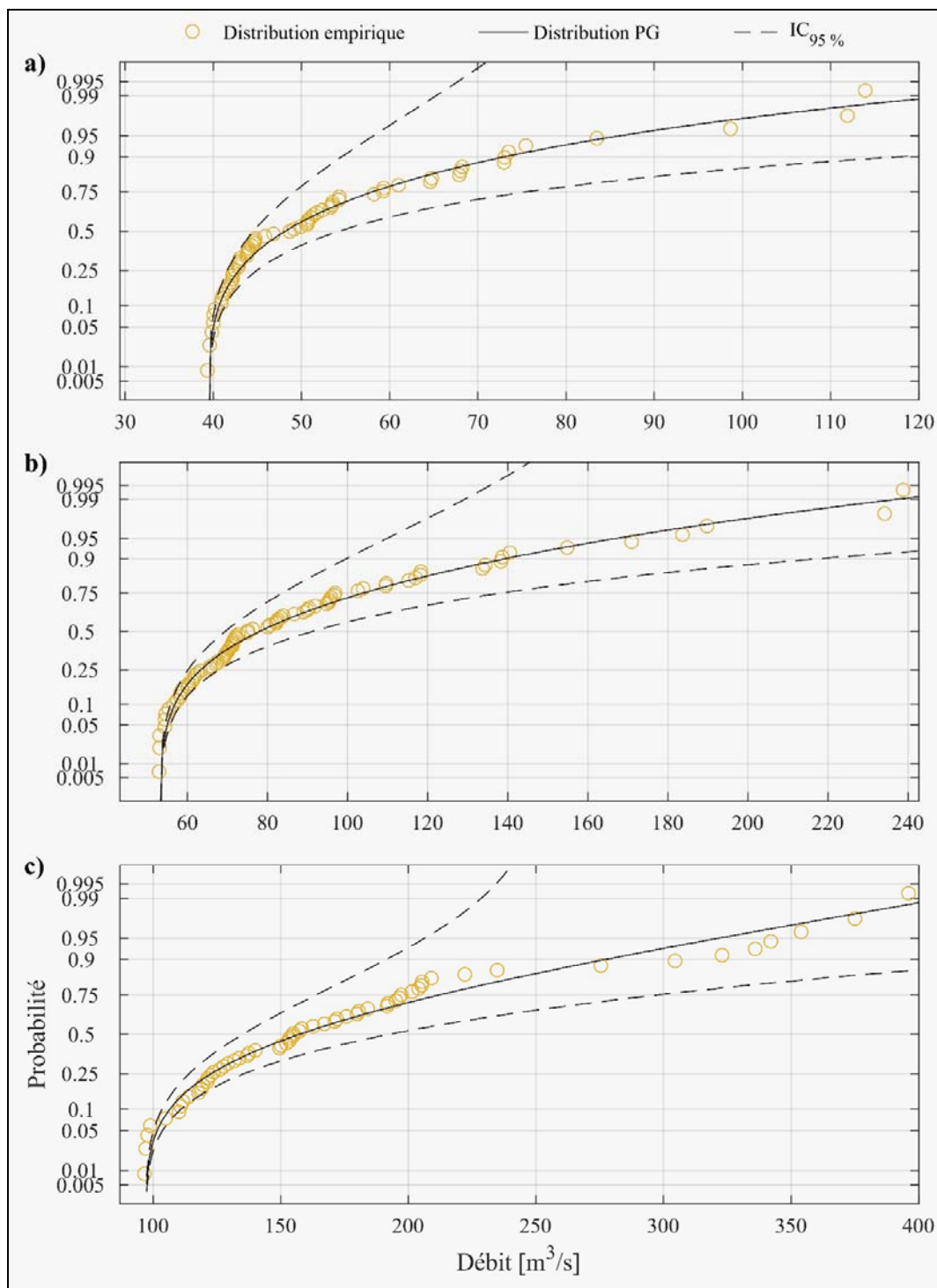


Figure 12 - Exemples d'ajustement d'une distribution de type PARETO Généralisée (PG) sur une distribution empirique des séries supseuil.

a : scénario 1 - bloc 41 - $d = 5j$ - $AIC_{norm} = 7,4$.

b : scénario 5 - bloc 17 - $d = 2j$ - $AIC_{norm} = 9,3$.

c : scénario 9 - bloc 7 - $d = 1h$ - $AIC_{norm} = 10,9$.

La représentation des courbes QdF est utile aux gestionnaires, car elle fournit une aide à la décision pour un niveau de risque jugé acceptable, en considérant la fréquence (période de retour) et la durée de submersion. Mais l'approche QdF peut également être utile dans une

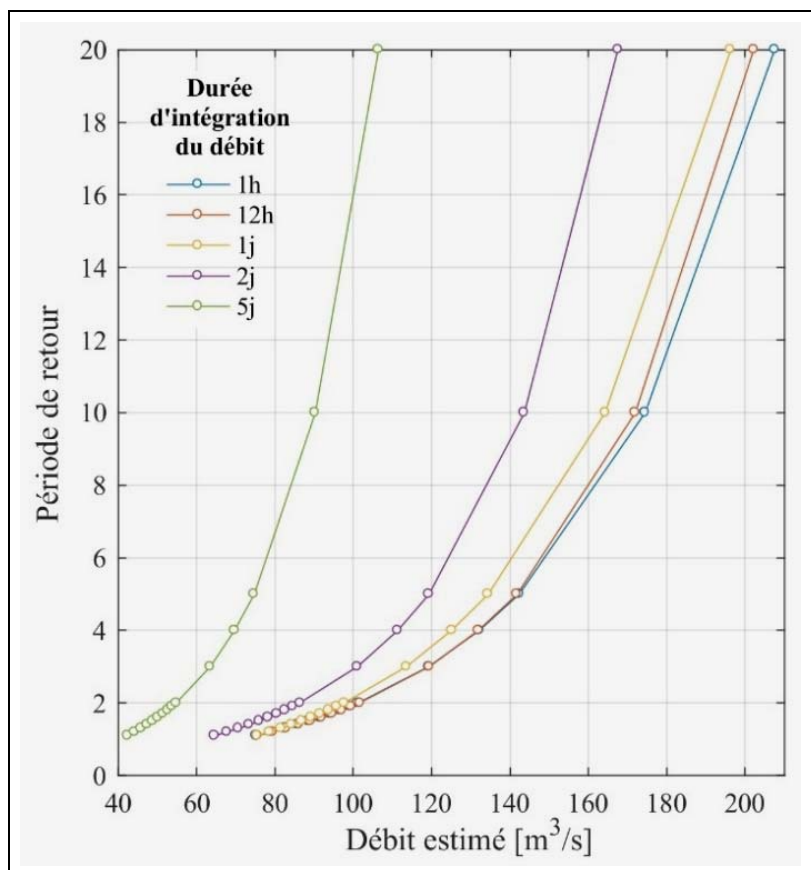


Figure 13 - Courbes QdF pour le bloc 23 (l'Ourthe à Durbuy) suivant les durées d'intégration du débit d : exemples des périodes de retour de 1,1 à 20 ans.

étude prospective, en vue de tester si un choix basé sur un climat de référence serait pertinent pour un climat différent.

b. Scénarios de variabilité climatique long terme

La figure 14 indique les résultats obtenus pour l'ensemble des 13 scénarios de variabilité long terme. Jusqu'à une période de retour de 10 ans, les scénarios hydro-climatiques fournissent des débits globalement plus faibles que le climat actuel, mais avec deux exceptions liées à la durée d'intégration : pour $d = 1h$ (répartition équitable autour du scénario de référence) et $d = 5j$ (débits supérieurs à ceux de référence dans la majorité des cas). Au delà d'une période de retour de 10 ans, pour $d = 1h$ à $d = 5j$, les scénarios hydro-climatiques donnent le plus souvent des débits supérieurs à ceux du scénario de référence.

Sur la figure 14, on note que le Q_{1SD} de référence est associé à des périodes de retour inférieures à 4 ans pour $1h < d < 2j$ et de 17 ans environ pour $d = 5j$. Ces valeurs, situées dans la fourchette des probabilités pour laquelle l'ajustement est jugé fiable (voir *supra*, paragraphes IV-4-c et d), indiquent une nette diminution de la fréquence des débordements lorsque la durée passe de 2 à 5 jours.

Les périodes de retour de Q_{1SD} estimées pour les scénarios de variabilité hydro-climatique long terme vont de 1,2 à 6,2 ans pour $d = 1h$ (Fig. 14-a) et de 9,9 à 46,5 ans pour $d = 5j$ (Fig. 14-e). Pour $1h < d < 2j$, la majorité des scénarios indique un Q_{1SD} légèrement moins fréquent que dans le climat actuel. À l'inverse, pour $d = 5j$, le Q_{1SD} est associé, dans la plupart des cas (10 scénarios sur 13), à une période de retour plus faible.

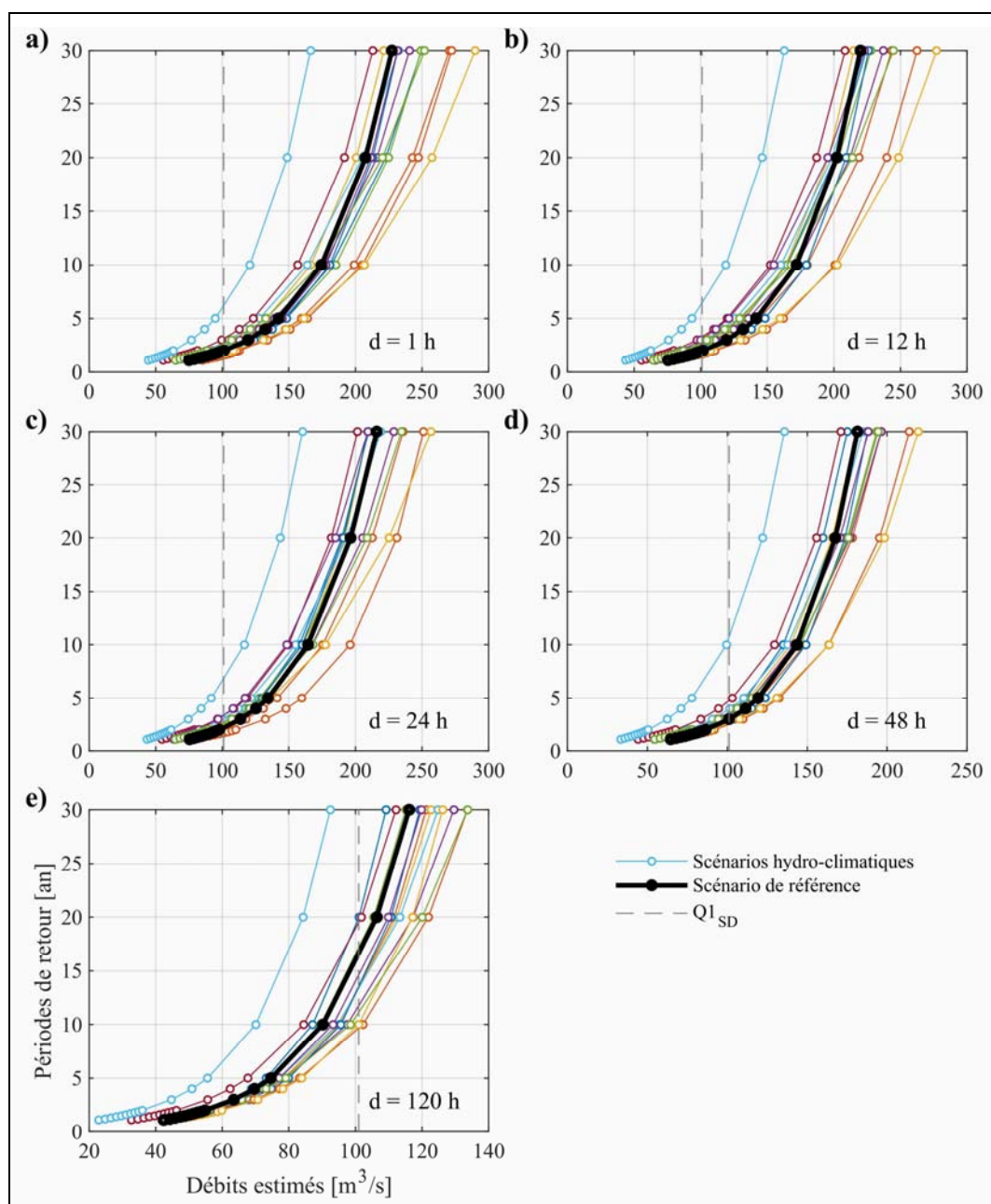


Figure 14 - Courbes QdF établies pour le bloc 23 et les durées d'intégration du débit étudiées : scénario de référence correspondant au climat actuel et scénarios de variabilité climatique long terme.

2) À l'échelle du tronçon

a. Probabilités d'occurrence de $Q1_{SD}$

Les périodes de retour obtenues, pour chaque bloc du tronçon Hotton-Tabreux et pour chacun des scénarios hydro-climatiques, sont présentées sur la figure 15.

Cette figure montre clairement une dispersion importante en variabilité climatique long terme. Il faut toutefois relativiser ce constat, notamment pour les petites probabilités au non dépassement, et rappeler au contraire qu'un petit écart dans les fortes probabilités signifie une

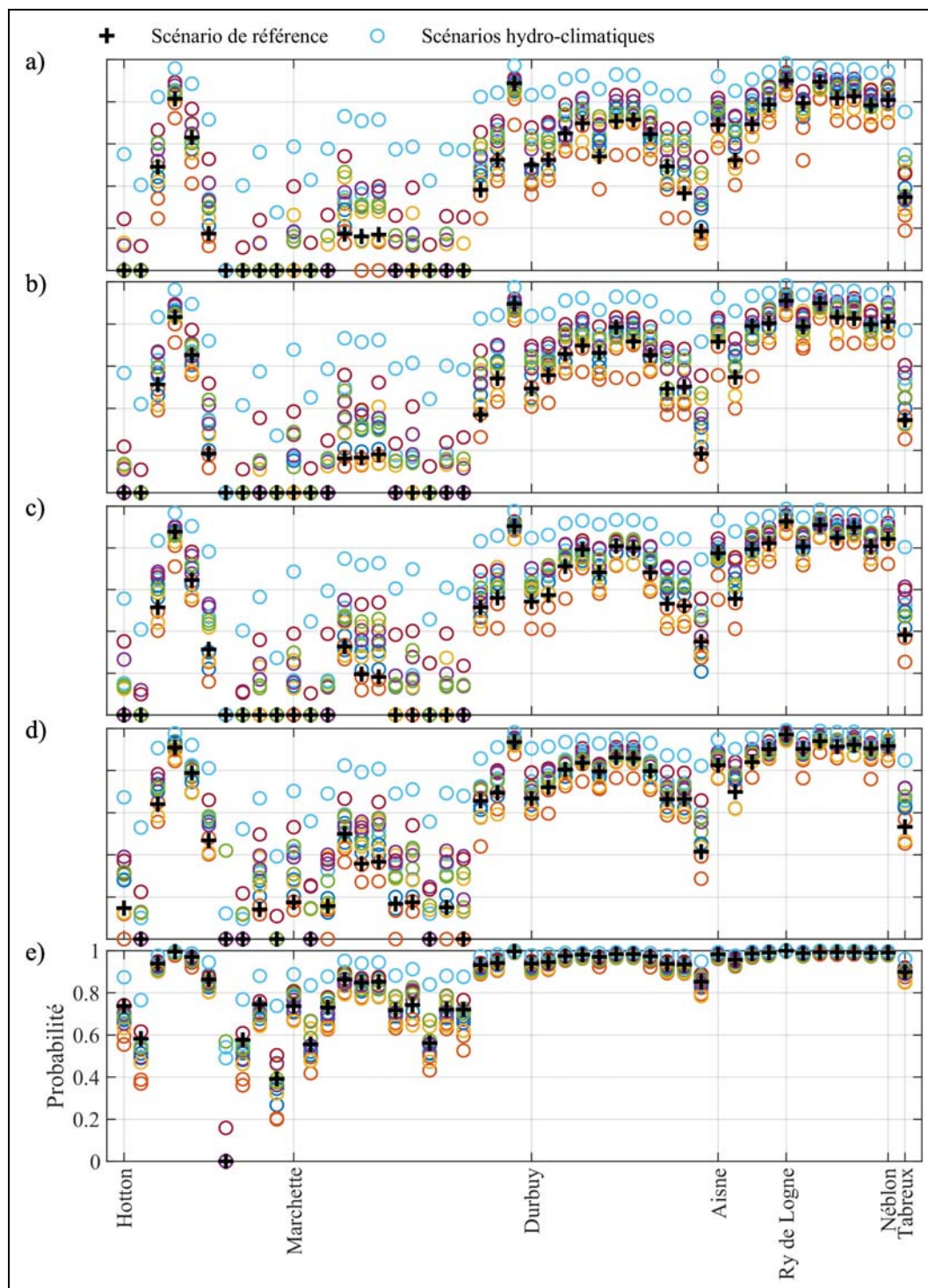


Figure 15 - Probabilités de non dépassement du $Q1_{SD}$ de chaque bloc pendant 1h (a), 12h (b), 1j (c), 2j (d), 5j (e).

Le scénario de référence correspond au climat actuel et les scénarios hydro-climatiques, aux scénarios de variabilité climatique long terme.

différence considérable de période de retour. La figure 15 témoigne néanmoins de changements potentiels importants.

Ces changements sont spatialement différenciés le long du tronçon. Dans une petite

moitié amont, les probabilités sont assez faibles pour d compris entre $1h$ et $2j$ (pour beaucoup inférieures à $0,8$ – soit une période de retour de 5 ans). Les changements induits par la variabilité climatique sont par conséquent relativement modérés. La figure 15 indique en général soit une tendance peu marquée (les scénarios se neutralisent autour du climat de référence) soit une période de retour plus élevée pour une majorité des scénarios. Pour $d = 5j$, au contraire, les probabilités sont globalement plus élevées et la probabilité d'apparition du $Q1_{SD}$ est plus forte.

On remarque également, pour 14 blocs quand $1h < d < 1j$, 7 blocs quand $d = 2j$ et 1 bloc quand $d = 5j$, que la probabilité de référence est nulle. Ces blocs (notamment les 12,25 % de cas évoqués plus haut) présentent, en climat de référence, une fréquence de débordement au moins annuelle (période de retour de 1 an ou moins). Pour ces mêmes blocs, une partie des scénarios hydro-climatiques donnent aussi une probabilité nulle. L'analyse fréquentielle ne fournit pas, alors, d'indication sur la fréquence intra-annuelle de débordement et donc ne renseigne pas sur la teneur d'un changement vis-à-vis du climat actuel. Sans connaître la période de retour intra-annuelle, on considère néanmoins, pour la référence comme pour les scénarios hydro-climatiques, qu'une probabilité nulle indique au moins un débordement/an en moyenne. Un changement entre référence et scénario hydro-climatique n'est donc décelable que lorsque le scénario climatique donne une probabilité non-nulle et la référence une probabilité nulle (changement vers une fréquence réduite) ou lorsque le scénario hydro-climatique donne une probabilité nulle et la référence une probabilité non-nulle (changement vers une fréquence accrue).

Dans la moitié aval du tronçon, les débordements sont globalement moins fréquents (probabilités au non dépassement élevées), ce constat s'accroissant en même temps que d . Dans l'ensemble, pour $1h < d < 2j$, la majorité des scénarios traduisent une raréfaction des débordements (probabilités au non dépassement plus élevées que celle de référence). Au contraire, les résultats pour $d = 5j$ sont majoritairement caractérisés par une augmentation des débordements.

b. Synthèse de l'évolution potentielle de la fréquence de débordement

Pour apporter une vue synthétique des résultats, la tendance dominante parmi l'ensemble des scénarios hydro-climatiques a été extraite, pour chaque bloc et chaque durée d'intégration, en distinguant les blocs où les périodes de retour d'un débordement (exprimé par le $Q1_{SD}$) sont majoritairement inférieures (occurrences en hausse), équivalentes (occurrences égales) ou supérieures (occurrences en baisse) par rapport au climat actuel (Fig. 16). Précisons que les blocs donnant comme scénario majoritaire un maintien de la période de retour de référence de $Q1_{SD}$ (Fig. 16, en gris) correspondent à une probabilité nulle majoritaire parmi les scénarios.

Cette figure est en accord avec les résultats présentés dans le paragraphe précédent. Pour des durées d'intégration du débit de $1h$ à $2j$, les évolutions dominantes tendent vers des périodes de retour plus fortes et donc des débordements moins fréquents. À l'inverse, pour une durée longue ($5j$), les périodes de retour diminuent en majorité et les débordements deviennent donc plus fréquents.

3) Apports et limites de la méthodologie

La méthodologie employée dans nos travaux se révèle intéressante pour réaliser un premier diagnostic spatialisé du débordement d'un cours d'eau dans un contexte de variabilité climatique long terme. Bien évidemment, la question des incertitudes liées à une telle démarche se pose. Cet article n'a pas l'ambition de répondre à cette question. Il tente simplement

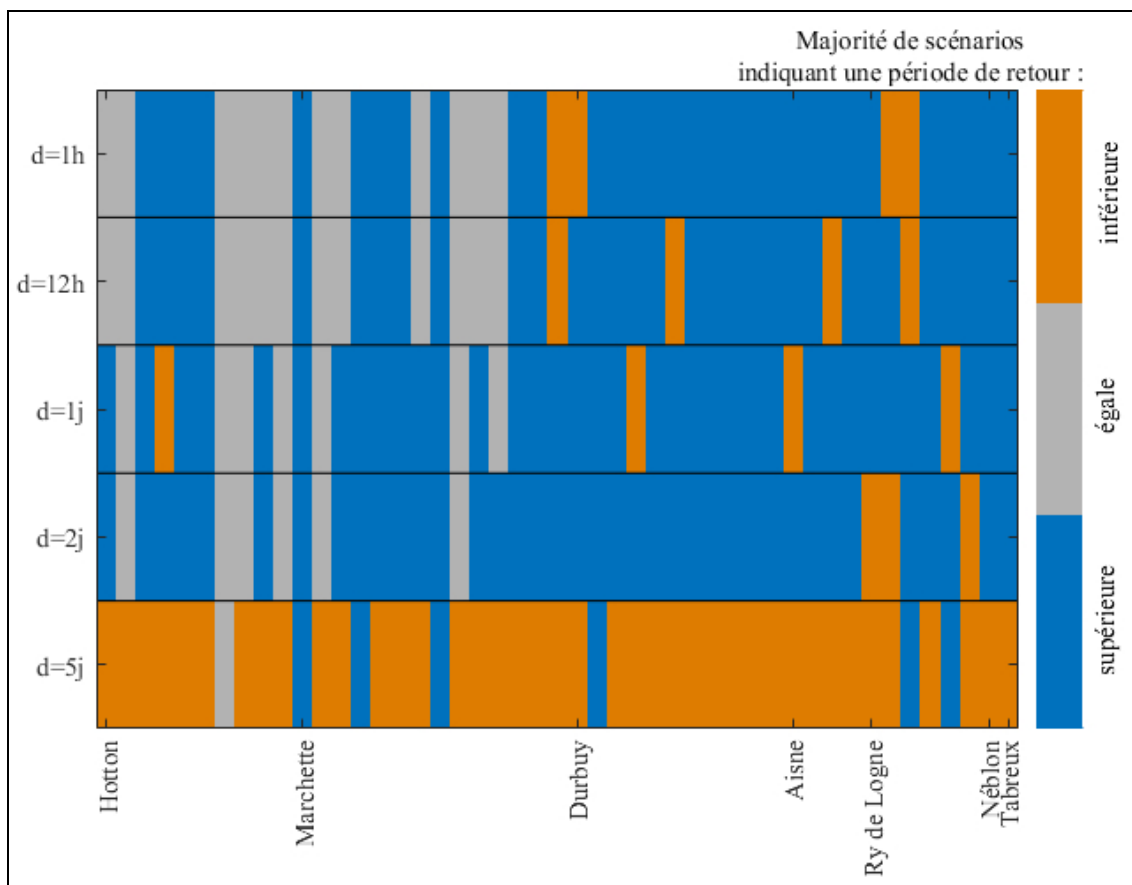


Figure 16 - Synthèse de l'impact de la variabilité climatique long terme sur la fréquence d'apparition du $Q1_{SD}$ entre Hotton et Tabreux.

La couleur indique, pour chaque bloc, la situation dominante exprimée par les scénarios de variabilité climatique long terme au regard du climat actuel. Les rectangles représentent les blocs depuis l'amont (Hotton) vers l'aval (Tabreux). Les lignes sont associées à une durée d'intégration d .

La barre, à droite, donne la correspondance entre la couleur et l'évolution dominante de la période de retour.

d'instiller davantage de robustesse dans l'étude d'impact du changement climatique, en prenant en compte la variabilité long terme du climat du bassin étudié. À cet effet, plusieurs choix méthodologiques ont été effectués : une approche multi-scénarios pour le climat, conduisant à la prise en compte des contrastes climatiques dans l'étude d'impact, et un calage climatique-ment robuste du modèle hydrologique. Cette première base de travail pourrait être consolidée, par exemple en utilisant d'autres modèles empiriques globaux, de façon à évaluer l'incertitude des diagnostics hydrologiques (G. SEILLER *et al.*, 2013 ; S. WESTRA *et al.*, 2014). Dans cette optique, un travail de "benchmarking" et une évaluation préalable des modèles hydrologiques pourraient être entrepris, suivant les préconisations de V. KRYSANOVA *et al.* (2018).

La désagrégation temporelle, opérée en deux étapes (du mensuel vers le journalier, puis du journalier vers l'horaire), peut paraître simpliste et d'autres options pourraient être envisagées. Le choix d'un coefficient de rugosité unique sur l'ensemble du tronçon, même s'il facilite grandement les traitements et réduit considérablement les temps de calcul, est lui aussi discutable. Toutefois les résultats obtenus avec ce coefficient ont été comparés, sur une partie

restreinte du tronçon, à ceux issus du modèle hydraulique WOLF 2D et se sont avérés cohérents (B. GRELIER, 2017). De même, si nos résultats n'ont pas été confrontés à des données de débordements historiques, la comparaison réalisée avec les résultats du modèle WOLF 2D sur une petite partie du tronçon peut être considérée comme un premier pas vers cet objectif : ce modèle a en effet été éprouvé et validé pour la simulation d'événements historiques (S. ERPICUM *et al.*, 2010).

Le modèle WOLF 1D permet de tester sous un mode instationnaire plusieurs scénarios hydro-climatiques de manière relativement rapide et de les étendre sur un tronçon d'une longueur importante. Pour gagner du temps de traitement et d'analyse, les séquences de débordement ont été qualifiées à l'échelle d'un bloc. Bien qu'ils permettent déjà de fournir des résultats intéressants, les choix du modèle 1D et de cette échelle spatiale peuvent être perçus comme trop synthétiques. Dans ce sens, on pourrait envisager de répliquer les traitements à l'échelle d'une maille de modèle, afin d'affiner l'analyse spatiale du débordement. De même, il serait intéressant, sur un domaine réduit (par exemple, pour une ou plusieurs mailles), de reproduire l'analyse à l'aide d'un modèle 2D. Ce type de modèle procure, en effet, une représentation bien plus fidèle de la réalité du terrain et de l'hétérogénéité des écoulements, en particulier en plaine inondable pour des débits largement supérieurs aux débits de plein bord.

Enfin, l'analyse QdF s'avère un choix pertinent, car elle permet de considérer la notion de durée, essentielle dans la variable de débordement. De plus, en l'automatisant, elle peut être facilement appliquée pour tester une gamme étendue de scénarios à tout un tronçon de rivière. Un point qui reste cependant en suspens concerne les blocs pour lesquels la fréquence de débordement est supérieure à un an : l'analyse fréquentielle n'a pas permis d'identifier un changement de fréquence à l'échelle intra-annuelle, ce qui appelle des développements complémentaires.

VII - CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans la gestion du risque inondation, il semble essentiel d'appréhender la variabilité du climat à long terme, d'autant que celle-ci est susceptible de changer radicalement au cours des prochaines décennies en Europe de l'Ouest. Le "changement climatique" d'origine anthropique, en modifiant les pluies et les températures, et par conséquent le régime des rivières, représente une source de forçage importante des inondations. Pour les aménageurs, celles-ci sont associées à un débit de projet et à une période de retour. Toutefois cette approche "classique" ne prend pas en compte la diversité hydrologique des bassins et la dynamique temporelle de leurs crues. L'approche débit-durée-fréquence (QdF) répond à ces exigences en intégrant, dans l'analyse fréquentielle, la notion de durée.

Dans cet article, nous avons emprunté cette voie, en nous focalisant sur la modélisation des débordements le long d'un tronçon de l'Ourthe (rivière des Ardennes belges) dans un contexte de variabilité climatique long terme. Avec l'aide de la modélisation hydraulique et après l'identification d'un débit seuil considéré comme indicateur de débordement, l'analyse QdF nous a permis de tester une large gamme de scénarios hydro-climatiques représentatifs de la variabilité hydro-climatiques long terme. Un certain nombre de changements ressortent de l'analyse, suggérant, de façon dominante, des débordements inférieurs à 2j moins fréquents et des débordements "longs" plus fréquents.

L'approche développée ici peut intéresser les gestionnaires du risque inondation désireux

de prendre en compte la non-stationnarité du climat et de donner un caractère robuste à leur méthode d'analyse. En établissant une gamme de scénarios hydro-climatiques représentatifs des conditions climatiques sur le long terme, les territoires inondables pourront être aménagés en tenant compte des scénarios de débordement les "plus probables", mais aussi de scénarios qui, pour être moins certains, sont susceptibles d'avoir des effets hydrologiques et sociétaux importants. Les diagnostics ainsi posés seront un atout pour guider le choix des mesures d'adaptation les plus pertinentes à distribuer le long du cours d'eau en fonction des enjeux. Mais des recherches devront être développées pour intégrer les aménagements (digues, haies transversales en plaine inondable...) dans le modèle hydraulique.

Remerciements : Nous exprimons notre reconnaissance aux relecteurs de cet article, dont les remarques nous ont guidés pour de sensibles améliorations.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BRIGODE P., OUDIN L. et PERRIN C. (2013) - Hydrological model parameter instability: a source of additional uncertainty in estimating the hydrological impacts of climate change? *Journal of Hydrology*, vol. 476, p. 410-425.
- BROWN C. et WILBY R.L. (2012) - An alternate approach to assessing climate risks. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, vol. 3, n° 1, p. 401-402.
- CŒUR D. et LANG M. (2017) - The contribution of historical data for the understanding of floods and risk prevention. In : *Floods*, F. VINET édit., Édit. Elsevier, p. 227-239.
- DAYON G. (2015) - *Évolution du cycle hydrologique continental en France au cours des prochaines décennies*. Thèse de l'Université Toulouse III - Paul Sabatier, en ligne : <http://thesesups.ups-tlse.fr/2974/>.
- DE BOER-EUSER T., BOUAZIZ L., DE NIEL J., BRAUER C., DEWALS B., DROGUE G., FENICIA F., GRELIER B., NOSSENT J., PEREIRA F., SAVENIJE H., THIREL G. et WILLEMS P. (2017) - Looking beyond general metrics for model comparison – lessons from an international model intercomparison study. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 21, n° 1, p. 423-440.
- DE WIT M., VAN DEN HURK B., WARMERDAM P., TORFS P., ROULIN E. et VAN DEURSEN W. (2007) - Impact of climate change on low-flows in the river Meuse. *Climatic Change*, vol. 82, n° 3, p. 351-372.
- DEGOUTTE G. (2001) - *Hydraulique et dynamique fluviale*. Édit. ENGREF, cours du DEA "Hydrologie, hydrogéologie, géostatistique et géochimie" (Université Pierre et Marie Curie, École des Mines de Paris, ENGREF, Université Paris Sud), 306 p., en ligne : <http://www.hydrologie.org/MISC/hydr/degoutte/degoutte0.pdf>.
- DETREMBLEUR S., STILMANT F., DEWALS B., ERPICUM S., ARCHAMBEAU P. et PIROTON M. (2015) - Impacts of climate change on future flood damage on the river Meuse, with a distributed uncertainty analysis. *Natural Hazards*, vol. 77, n° 3, p. 1533-1549.
- DEWALS B. et FOURNIER M. (2013) - *Transboundary water management in a changing climate*. AMICE Project Final Conference (Sedan), Édit. CRC Press, Londres (GB), 128 p.
- DEWALS B., ARCHAMBEAU P., ERPICUM S. et PIROTON M. (2017) - Influence of the

- operation of Nisramont dam and reservoir on hydrological modelling of the Ourthe catchment. *Supplement of Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 21, p. 423-440.
- DRIESSEN T., HURKMANS R., TERINK W., HAZENBERG P., TORFS P. et UIJLENHOET R. (2010) - The hydrological response of the Ourthe catchment to climate change as modelled by the HBV model. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 14, n° 4, p. 651-665.
- DROGUE G., FOURNIER M., BAUWENS A., BUITEVELD H., COMMEAUX F., DEGRÉ A., DE KEISER O., DETREMBLEUR S., DEWALS B., FRANÇOIS D., GUILMIN E., HAUSMANN B., HISSEL F., HUBER N., LEBAUT S., LOSSON B., KUFELD M., NACKEN H., PIROTTON M., PONTÉGNIE D., SOHIER C. et VANNEUVILLE W. (2010) - *Analysis of climate change, high-flows and low-flows scenarios on the Meuse river basin. WP1 report - Action 3. Projet AMICE (Adaptation of the Meuse to the Impact of Climate Evolution), programme NWE INTERREG IVB*, 69 p., en ligne : <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/66197/1/WP1-1%20Report.pdf>.
- ERNST J., DEWALS B., DETREMBLEUR S., ARCHAMBEAU P., ERPICUM S. et PIROTTON M. (2010) - Micro-scale flood risk analysis based on detailed 2D hydraulic modelling and high resolution geographic data. *Natural Hazards*, vol. 55, n° 2, p. 181-209.
- ERPICUM S., ARCHAMBEAU P., DETREMBLEUR S., DEWALS B. et PIROTTON M. (2007) - Reservoirs to mitigate flood events on the river Ourthe in Belgium. *Proceedings of the 75th Annual Meeting of the International Committee on Large Dams* (Saint-Petersbourg, Russie), 12 p., en ligne : <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/2643/1/Reservoir%20to%20mitigate%20flood%20events%20on%20the%20river%20Ourthe%20in%20Belgium.pdf>.
- ERPICUM S., DEWALS B., ARCHAMBEAU P., DETREMBLEUR S. et PIROTTON M. (2010) - Detailed inundation modelling using high resolution DEMs. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, vol. 4, n° 2, p. 196-208.
- GALÉA G. et PRUDHOMME C. (1997) - Notions de base et concepts utiles pour la compréhension de la modélisation synthétique des régimes de crue des bassins versants au sens des modèles QdF. *Revue des Sciences de l'Eau*, vol. 10, n° 1, p. 83-101.
- GIRON E., CONINX I., DEWALS B., EL KAHLOUN M., DESMET L., SACRÉ D., DETREMBLEUR S., BACHUS K., PIROTTON M., MEIRE P., DE SUTTER R. et HECQ W. (2009) - *Towards an integrated decision tool for adaptation measures - Case study: floods "ADAPT" (SD/CP/02A)*. Résumé du rapport final - phase 1, Politique Scientifique Fédérale, Bruxelles, 7 p. (research programme Science for a Sustainable Development), en ligne : https://www.belspo.be/belspo/ssd/science/Reports/ADAPT1_Summary%20Ph1.pdf.
- GRELIER B. (2017) - *Aléa climatique et débits des cours d'eau dans le bassin transnational de la Meuse - Co-variabilité, changements possibles et impact sur les débordements*. Thèse de l'Université de Lorraine et de l'Université de Liège, Metz, 346 p., en ligne : <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01684884v1>.
- GRELIER B., DROGUE G., PIROTTON M., ARCHAMBEAU P. et DEWALS B. (2016) - An alternate approach for assessing impacts of climate change on water resources: combining hazard likelihood and catchment sensitivity. *Proceedings of the 4th European Congress of the IAHR* (Liège, Belgique), p. 910-919.
- GUPTA H.V., KLING H., YILMAZ K.K. et MARTINEZ G.F. (2009) - Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, vol. 377, n° 1, p. 80-91.

-
- GUSTARD A. et DEMUTH S., sous la direction de (2009) - *Manual on low-flow estimation and prediction*. Édit. World Meteorological Organization, Operational Hydrology Report n° 50, WMO n° 1029, Genève (Suisse), 136 p., en ligne : http://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/publications/low-flow_estimation_prediction/WMO%201029%20en.pdf.
- JAVELLE P. (2001) - *Caractérisation du régime des crues : le modèle débit-durée-fréquence convergent - Approche locale et régionale*. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 268 p.
- KRYSAKOVA V., DONNELLY C., GELFAN A., GERTEN D., ARHEIMER B., HATTERMANN F. et KUNDZEWICZ Z. (2018) - How the performance of hydrological models relates to credibility of projections under climate change. *Hydrological Sciences Journal*, vol. 63, n° 5, p. 696-720.
- LANG M. et LAVABRE J., sous la direction de (2007) - *Estimation de la crue centennale pour les plans de prévention des risques d'inondations*. Édit. Quæ, collection "Update Sciences et Technologies", 232 p.
- LANG M., OUARDA T. et BOBÉE B. (1999) - Towards operational guidelines for over-threshold modeling. *Journal of Hydrology*, vol. 225, n° 3, p. 103-117.
- LUTERBACHER J., XOPLAKI E., DIETRICH D., RICKLI R., JABOBEIT J., BECK C., GYALISTRAS D., SCHMUTZ C. et WANNER H. (2002) - Reconstruction of sea level pressure fields over the Eastern North Atlantic and Europe back to 1500. *Climate Dynamics*, vol. 18, n° 7, p. 545-561.
- MADSEN H., LAWRENCE D., LANG M., MARTINKOVA M. et KJELDSEN T. (2014) - Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe. *Journal of Hydrology*, vol. 519, p. 3634-3650.
- MIKE (2017) - *EVA-Extreme Value Analysis. Technical reference and documentation*. Édit. DHI, 87 p (42 p. + annexes), en ligne : http://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/General/EVA_SciDoc.pdf.
- LOUDIN L., HERVIEU F., MICHEL C., PERRIN C., ANDRÉASSIAN V., ANCTIL F. et LOUMAGNE C. (2005) - Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 2 – Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for runoff-rainfall modelling. *Journal of Hydrology*, vol. 303, n° 1-4, p. 290-306.
- PERRIN C., MICHEL C. et ANDRÉASSIAN V. (2003) - Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, vol. 279, n° 1-4, p. 275-289.
- PIROTTON M., ERPICUM S., ARCHAMBEAU P., DETREMBLEUR S., FRAIKIN C. et DEWALS B. (2004) - Le modèle WOLF : outil de modélisation d'écoulement de crue, de dimensionnement et de gestion des ouvrages hydrauliques. *La Tribune de l'Eau*, vol. 56, n° 624/4, p. 13-24.
- PRUDHOMME C., WILBY R., CROOKS S., KAY A. et REYNARD N. (2010). Scenario-neutral approach to climate change impact studies: application to flood risk. *Journal of Hydrology*, vol. 390, n° 3-4, p. 198-209.
- REBOLHO C., ANDRÉASSIAN V. et LE MOINE N. (2018) - Inundation mapping based on reach-scale effective geometry. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 22, n° 11, p. 5967-5985.
- SAUQUET É., JAVELLE P. et LE CLERC S. (2003) - Description des régimes hydrologiques des hautes-eaux : nouvelle formulation pour l'analyse en débit-durée-fréquence et applications

-
- en ingénierie. *Ingénieries*, vol. 34, p. 3-15, en ligne : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00466032>.
- SEILLER G., ANCTIL F. et PERRIN C. (2012) - Multimodel evaluation of twenty lumped hydrological models under contrasted climate conditions. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 16, n° 4, p. 1171-1189.
- SMITH J., HALLETT K., HENDERSON J. et STRZEPEK K. (2007) - Expanding the toolkit for water management in an uncertain climate. *Southwest Hydrology*, vol. 6, p. 24-36.
- TABARI H., TAYE M. et WILLEMS P. (2015) - Water availability change in central Belgium for the late 21st century. *Global and Planetary Change*, vol. 131, p. 115-123.
- TERRAY L. et BOÉ J. (2013) - Quantifying 21st-century France climate change and related uncertainties. *Comptes Rendus Geoscience*, vol. 345, n° 3, p. 136-149.
- ULLMANN A., FONTAINE B. et ROUCOU P. (2013) - Euro-Atlantic weather regimes and Mediterranean rainfall patterns: present-day variability and expected changes under CMIP5 projections. *International Journal of Climatology*, vol. 34, p. 2634-2650.
- WAAGE M.D. et KAATZ L. (2011) - Nonstationary water planning: an overview of several promising planning methods. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, vol. 47, n° 3, p. 535-540.
- WESTRA S., THYER M., LEONARD M., KAVETSKI D. et LAMBERT M. (2014) - A strategy for diagnosing and interpreting hydrological model nonstationarity. *Water Resources Research*, vol. 50, n° 6, p. 5090-5113.
- WILBY R.L. et DESSAI S. (2010) - Robust adaptation to climate change. *Weather*, vol. 65, n° 7, p. 180-185.

Article reçu le 15 mai 2018.

Accepté après révision le 29 mars 2019.

Mis en ligne le 13 avril 2019.