

Analyse du changement climatique, des scénarios de crue et d'étiage sur le bassin de la Meuse

Résumé du rapport du WP1 – actions 1 et 3



LE BASSIN VERSANT DE LA MEUSE : Un lien majeur entre Belgique, France, Allemagne, Luxembourg et Pays-Bas

Le bassin versant de la Meuse est l'une des zones les plus densément peuplées d'Europe occidentale et représente un lien géographique majeur. Depuis 2002, cinq pays européens ont travaillé conjointement au sein de la Commission Internationale de la Meuse (CIM).

Le fleuve est navigable et approvisionne plus de 5 millions d'habitants en eau potable.

Voici les principales caractéristiques du bassin de la Meuse :

- **Longueur du fleuve : 900 km**
- **Bassin versant : 35 000 km²**
- **Nombre d'habitants : 9 millions**

La Meuse coule du sud au nord. Elle prend sa source en France sur le Plateau de Langres (384 m. d'altitude). Après avoir parcouru 355 km sur des terres essentiellement agricoles et forestières, la Meuse quitte le sous-bassin français (10 120 km²) et arrive en Belgique.

Elle traverse les Ardennes dans la Province de Namur où elle conflue successivement avec la Lesse et la Sambre, puis draine la Province de Liège où elle conflue le Houyoux et l'Ourthe. La Meuse quitte la région wallonne à Visé. Après un passage aux Pays-Bas par Maastricht, elle joue le rôle de frontière entre la Belgique et les Pays-Bas dans la province du Limbourg. Un tiers de sa surface est situé en région wallonne, ce qui représente environ 12 000 km².

Concernant les sous-bassins allemands, la Rur et la Niers sont les affluents les plus importants de la Meuse et représentent respectivement 7% et 4% de son bassin hydrographique. La Rur est le seul affluent pouvant être contrôlé par un complexe de 6 réservoirs, représentant un volume de stockage d'environ 300 millions de m³, situés dans la partie amont. Les réservoirs sont utilisés pour la production d'eau potable, le soutien d'étiage et la réduction des inondations. Dans le bassin de la Niers, en raison d'une topographie très plate à l'aval, des mesures de contrôle de l'inondation sont nécessaires. En plus de la rétention naturelle dans les plaines inondables, la rétention est faite par des bassins écrêteur de crues contrôlés et par un endiguement des cours d'eau pour les crues petites et moyennes.

La Meuse termine sa course aux Pays-Bas à Eijsden, au sud de Maastricht. La partie hollandaise draine 7 700 km². Plusieurs grandes villes, telles que Roermond, Venlo, Nijmegen et 's-Hertogenbosch, sont situées à proximité du fleuve. De Eijsden à Borgharen, on parle de la Meuse « supérieure » (Bovenmaas). À Borgharen, les eaux de la Meuse sont divisées par la Meuse « mitoyenne » (Grensmaas) qui forme la frontière naturelle avec la Belgique, et le canal Juliana, creusé pour la navigation. Elle poursuit son cours en direction de la Mer du Nord par la Bergsche Maas et le Nieuwe Waterweg puis arrive dans l'estuaire Rhin-Meuse. Ici, les niveaux d'eau sont principalement déterminés par les marées et assez peu par les débits.

Le **climat** du bassin versant de la Meuse est semi-océanique pour la partie française avec un niveau de précipitations assez important toute l'année (environ 80 mm/mois) et maritime - tempéré humide en Belgique et aux Pays Bas en raison de sa latitude et de sa proximité avec la mer. Les Ardennes reçoivent plus de précipitations que le reste du bassin. Le **régime hydrologique** de la Meuse est unimodal (une seule période de basses eaux chaque année en été et une seule période de hautes eaux en hiver). Son débit varie considérablement selon les saisons : il a atteint 3 000 m³/s lors de la crue de décembre 1993 à Liège et peut descendre à 10-40 m³/s en été. Ce fleuve essentiellement alimenté par la pluie, n'a pas de glacier et possède une nappe phréatique ayant une faible capacité de stockage pour absorber les précipitations.

Il est donc extrêmement sensible à tout changement climatique.

Neuf stations de mesure sélectionnées dans 4 pays pour les simulations hydrologiques

La figure 2 présente l'ensemble des stations de mesure sélectionnées par les partenaires du projet AMICE pour alimenter les simulations hydrologiques :

- Quatre stations sont situées sur la partie française du bassin de la Meuse : Saint-Mihiel, Stenay, Montcy-Notre-Dame et Chooz.
- Une station est située à la frontière Wallonie / Pays-Bas : Sint Pieter.
- Quatre stations sont situées sur les affluents orientaux wallons et allemands : Gendron (sur la Lesse), Chaudfontaine (sur la Vesdre), Stah (sur la Rur) et Goch (sur la Niers).



Figure 2. Stations de mesure du bassin de la Meuse sélectionnées pour les simulations hydrologiques

Pour chaque station sélectionnée, des simulations hydrologiques ont été réalisées afin d'estimer l'évolution des débits en crue ou en étiage pendant le XXI^{ème} siècle.

En plus de la période de référence (1971-2000 ou 1961-1990), deux périodes futures ont été simulées : **2021-2050** et **2071-2100**. La stratégie d'adaptation et les connaissances sont élaborés à la fois pour une situation à moyen terme, plus utile pour la définition des mesures d'adaptation urgentes, et pour une situation à long terme pour laquelle les tendances climatiques d'origine anthropique sont plus claires. La période de 30 ans a été choisie car la majorité des stations hydrométriques ont été installées dans les années 1960 ou 1970.

ANALYSE et SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE du climat futur et des scénarios hydrologiques du bassin de la Meuse

Partage des connaissances à travers la plate-forme bibliographique collaborative transnationale (TORD)

La première action du projet consistait à mettre en place un outil de partage des références bibliographiques afin de mettre en commun les connaissances : la « TORD » (Transnational Online References Database) a été créée à cet effet. Chaque partenaire peut visualiser et y ajouter des références sur la Meuse, le changement climatique et tout autre sujet intéressant le projet AMICE.

Les requêtes peuvent être saisies par mot-clé, auteur et éditeur. Deux types de questions sont possibles (recherche rapide et détaillée). Plusieurs catégories correspondant aux points traités par AMICE permettent d'affiner la recherche de références. Neuf catégories ont été créées, comprenant 45 sous-catégories. Les deux premières concernent les langues et la géographie. Grâce à ce système, il est possible d'affiner la recherche de références bibliographiques et d'avoir une vue d'ensemble des sujets les plus (respectivement les moins) représentés dans la TORD.

Depuis décembre 2009, l'hébergement et l'administration de la TORD sont assurés par l'EPAMA et la base de données est désormais accessible via le site officiel du projet AMICE (www.amice-project.eu/biblio). Début 2010, huit mois après son lancement, la TORD contenait environ 800 références et plus de 1 000 auteurs cités.

Le besoin d'études régionalisées sur le bassin versant de la Meuse confirmé par l'analyse bibliographique

Suite à ce travail préliminaire de bancarisation des références disponibles sur le bassin-versant de la Meuse, des lacunes en matière de connaissances ont été détectées. A ce jour, les études les plus complètes de l'impact du changement climatique sur l'hydrologie de la Meuse ont été réalisées par De Wit *et al.*¹ et Leander *et al.*². Les conclusions de ces articles portent sur la possible augmentation d'évènements extrêmes, des crues et des étiages et sur le besoin de préciser les autres impacts.

En France, aucune étude spécifique couvrant l'ensemble du bassin de la Meuse n'existe étant donné que les recherches ont été réalisées à l'échelle nationale. Le MEEDDM a sélectionné le bassin de la Meuse en tant que bassin pilote pour l'étude des impacts des évolutions du climat.

En Allemagne, aucune étude concernant l'impact du changement climatique sur les bilans hydriques et les débits n'a été réalisée pour la Rur et la Niers.

Le projet AMICE apportera de nouvelles conclusions et des informations précises à l'échelle régionale sur le bassin versant de la Meuse.

¹ De Wit M.J.M., van den Hurk B., Warmerdam P.M.M., Torfs P.J.J.F., Roulin E., van Deursen W.P.A., (2007). Impact of climate change on low-flows in the River Meuse. *Climatic change*, 82, pp 351-372.

² Leander R., Buishand A., van den Hurk B.J.J.M., de With M.J.M., (2008). Estimated changes in flood quantiles of the river Meuse from resampling of regional climate model output. *Journal of hydrology*, 351, pp 331-343.

Régionalisation des modèles de circulation générale (GCM)

Pour produire les futures simulations climatiques sous forçage anthropique, on utilise les modèles de circulation générale (GCM pour « Global Circulation Model » en anglais). Ils ont la capacité de simuler la circulation atmosphérique terrestre, le forçage climatique de l'océan et les interactions océan/atmosphère. A cause de leurs basses résolutions spatiales et temporelles (grilles de 100km² et pas de temps journalier), il est impossible de les utiliser pour des études hydrologiques réalisées à méso-échelle (10 000 km² – 100 km²) et à pas de temps horaire (pour les crues).

Des méthodes de downscaling (ou descente d'échelle régionale) ont été développées pour fournir des informations à l'échelle régionale. Elles permettent d'utiliser des GCM de haute résolution fournissant les entrées à un modèle climatique régional (RCM pour « Regional Climate Model » en anglais) nidé dans le GCM. Des différences existent entre les sorties du RCM et les données climatiques observées ; un post-traitement des sorties du RCM est donc nécessaire.

La nécessité d'établir de nouveaux scénarios climatiques et hydrologiques pour le projet AMICE

Afin d'établir un scénario climatique transnational, un inventaire de toutes les expériences numériques connues et employées par les partenaires AMICE a été réalisé. On peut en tirer plusieurs conclusions :

- > Le manque de simulations climatiques adaptées (et corrigées) au niveau du bassin
- > La plupart des simulations climatiques ne sont disponibles qu'au-delà de 2050
- > L'existence d'une grande incertitude sur les simulations climatiques
- > Le manque de temps pour réaliser des corrections sur les simulations climatiques

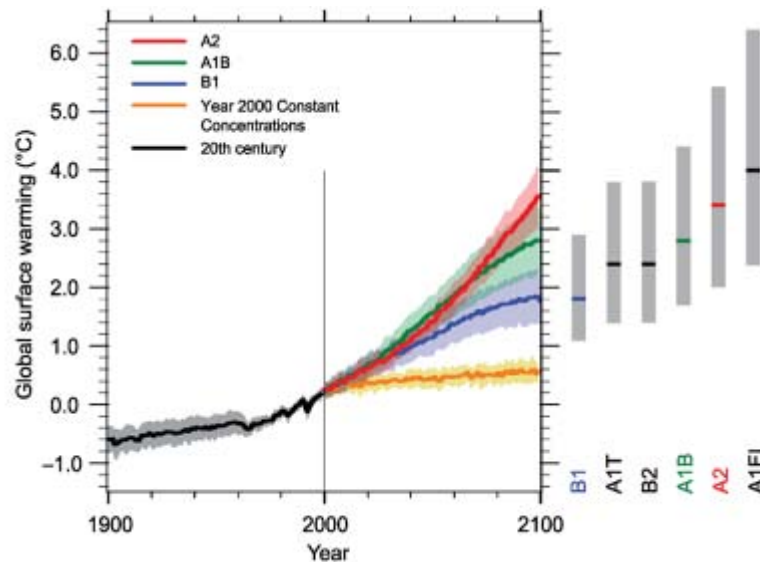
De même, il a été établi une synthèse bibliographique des impacts du changement climatique sur l'hydrologie du bassin de la Meuse. Elle a permis de conclure que les scénarios climatiques nationaux existants étaient en général trop hétérogènes et trop sporadiques pour être employés à l'échelle du bassin et nécessitaient la création de nouveaux scénarios climatiques pour le projet AMICE. La solution la plus optimale et la plus pragmatique pour réaliser un scénario climatique transnational commun dans le temps imparti est **la méthode des anomalies**. Celle-ci a donc été appliquée aux scénarios climatiques nationaux existants.

Sélection de deux scénarios pour la prise en compte des incertitudes sur l'évolution future du climat

Les scénarios concernant les émissions de gaz à effet de serre couramment employés dans des études sur le changement climatique ont été développés par le Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Évolution du Climat (GIEC) depuis 1996 et ont été décrits dans le rapport spécial sur les scénarios d'émissions (SRES). Pour chaque groupe, un scénario d'émission de référence a été sélectionné par les experts (A1B, A2, B1 et B2 – voir figure 3). Ces scénarios d'émission sont les plus utilisés pour les GCM et pour l'étude de l'impact du changement climatique.

Pour AMICE, **deux scénarios climatiques futurs sont considérés : un scénario climatique sec et un scénario climatique humide** basés sur les scénarios d'émission A2 et A1B. Ces derniers sont respectivement des scénarios d'émission pessimiste et intermédiaire. Par conséquent, les études réalisées dans le cadre d'AMICE présentent un large spectre de variations de la température de l'air et des précipitations pour prendre en compte les incertitudes sur les évolutions macro-économique et démographique du monde dans lequel nous vivons.

Figure 3. Évolution du réchauffement mondial de surface au XXI^{ème} siècle pour les différents scénarios d'émissions (IPCC, 2001).



PRODUCTION DES SCÉNARIOS CLIMATIQUES FUTURS

La méthode des anomalies : simuler le climat futur par forçage anthropique des conditions climatiques actuelles

La méthode des anomalies (figure 4) est la méthode sélectionnée par les partenaires AMICE pour créer des scénarios climatiques à haute résolution spatiale et temporelle. Les tendances saisonnières (anomalies en % pour les précipitations et anomalies en °C pour la température de l'air en hiver, au printemps, en été, à l'automne) ont été fournies par les instituts météorologiques nationaux pour les périodes 2021-2050 et 2071-2100 en fonction des simulations régionales et des scénarios d'émission du GIEC. Les anomalies saisonnières ont ensuite été employées pour forcer la climatologie actuelle sur les périodes 1961-1990 ou 1971-2000.

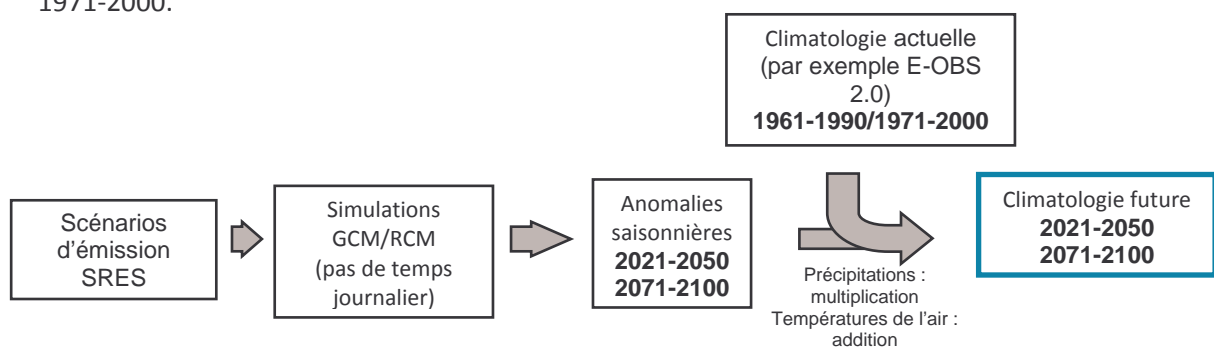


Figure 4. La méthode des anomalies

Cette méthode de post-traitement a été mise en place pour créer les scénarios climatiques humide et sec pour chaque période et pour chaque sous-bassin national.

Les partenaires se sont référés à des expériences numériques et des modèles de climat spécifiques pour modifier les anomalies saisonnières en fonction des scénarios humides et secs :

- Pour la France, ARPEGE-Climat, simulations A2 et A1B
- Pour la Wallonie, outil de perturbation CCI-HYDR
- Pour l'Allemagne, WETTREG pour le scénario humide et CLM pour le scénario sec
- Pour les Pays-Bas et la Flandre, projet européen PRUDENCE.

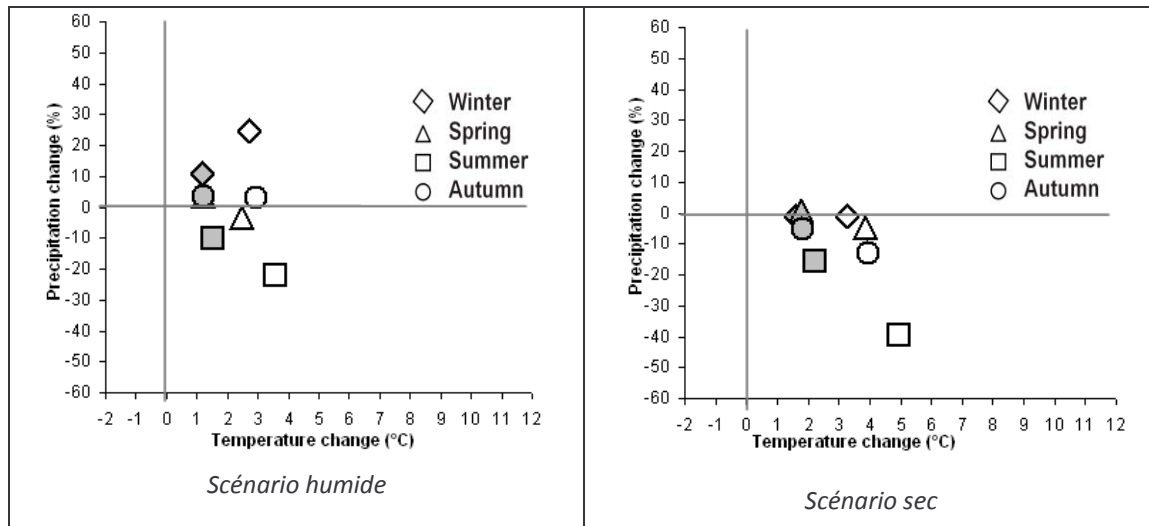
Combinaison des scénarios climatiques nationaux pour la création d'un scénario climatique transnational

Les anomalies saisonnières obtenues pour chaque sous-bassin national présentent d'importantes hétérogénéités. Pour maintenir l'unicité des débits à l'aval, en particulier aux frontières, un scénario climatique transnational a été établi par combinaison des anomalies nationales en proportion de la surface drainée de chaque sous-bassin (voir tableau 1). Les résultats sont présentés sur la figure 5.

Tableau 1. Coefficients utilisés pour établir les anomalies climatiques saisonnières transnationales

	Superficie (km ²)	Coefficient
France	10 120	0,31
Wallonie	10 880	0,33
Flandres et Pays-Bas	8 662	0,26
Allemagne	3 338	0,10
Meuse transnationale	33 000	1,0

Figure 5. Les anomalies saisonnières des précipitations (%) et de la température de l'air (°C) pour les scénarios climatiques transnationaux et pour les deux périodes (gris : 2021-2050 – blanc : 2071-2100)



Afin de vérifier la cohérence de la méthodologie utilisée, les anomalies climatiques saisonnières du projet AMICE obtenues pour les 2 scénarios transnationaux ont été comparées aux simulations régionalisées réalisés dans le cadre du projet européen PRUDENCE, achevé juste avant le projet AMICE. Les scénarios climatiques correspondent assez bien, ce qui renforce la confiance dans la méthodologie employée (voir figure 6).

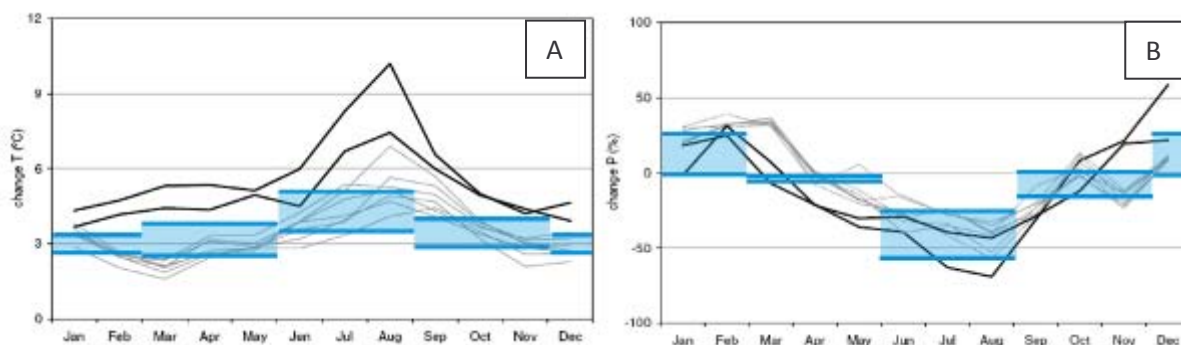


Figure 6. Les scénarios climatiques transnationaux AMICE (humide et sec : bandes bleues) par rapport aux simulations climatiques du projet PRUDENCE (courbes noires et grises) - 2071-2100 (De Wit et al., 2007). A) Anomalies de température de l'air – B) Anomalies de précipitations

PRODUCTION DES SCÉNARIOS HYDROLOGIQUES FUTURS

Modèles hydrologiques nationaux pour calculer les débits du fleuve

Pour la réalisation des simulations hydrologiques, chaque partenaire AMICE a utilisé ses propres modèles pluie-débit.

- En France, l'EPAMA et l'Université de Metz ont utilisé les modèles AGYR et GR4J
- En Wallonie, ULg - Gembloux Agro-Bio Tech a utilisé le modèle EPIC-Grid
- En Flandres, Flanders Hydraulics Research a utilisé TOPModel et MIKE11 Maas
- Aux Pays-Bas, le Rijkswaterstaat a utilisé le modèle HBV
- En Allemagne, RWTH-Aachen a utilisé les modèles NASIM et GR4J.

Au-delà de leurs différences, ces modèles utilisent généralement les mêmes variables climatiques d'entrée (températures de l'air, évapotranspiration potentielle et précipitations). Certains modèles intègrent les caractéristiques du bassin et du fleuve (pente, occupation du sol, surfaces imperméabilisés...) pour calculer le débit.

Un choix commun de variables pour décrire les inondations et étiages

Pour atteindre les objectifs du lot de travail n°1, les partenaires ont décidé de travailler sur un ensemble de variables hydrologiques d'impact. Pour les étiages, la variable sélectionnée est le MAM7 (débit minimum annuel sur 7 jours consécutifs), sélectionné entre avril et septembre. Il a été calculé pour plusieurs temps de retour : 2-5-10-25-50 ans. Pour les crues, deux variables communes ont été sélectionnées : le Qdx (débit moyen journalier maximum hivernal) et le Qhx (débit moyen horaire maximum hivernal). Les temps de retour correspondants sont 2-5-10-25-50-100 ans (+250 et 1250 ans à Sint Pieter). Les résultats des simulations hydrologiques produites dans le cadre du projet AMICE sont présentés pour un temps de retour centennal et sont notés ainsi : Qdx₁₀₀ et Qhx₁₀₀.

Application des lois de distribution statistique pour évaluer les temps de retour des débits extrêmes

Afin de définir les valeurs de débits pour les différents temps de retour, une distribution statistique doit être ajustée aux séries de débits observés et simulés.

La méthode d'échantillonnage des débits annuels maximum est la méthode la plus courante pour évaluer les quantiles des débits en hautes eaux. Une fois l'échantillon des valeurs de débits créé, une distribution statistique théorique est adaptée à l'ensemble des séries de débits annuels maximaux observés ou simulés. Pour le projet AMICE, les paramètres des lois statistiques théoriques sont généralement estimés par la méthode du maximum de vraisemblance. Différentes lois statistiques théoriques (Gumbel, Weibull, etc.) ont été utilisées pour calculer les quantiles de la valeur des débits maximum horaires en hiver (Qhx₁₀₀) et les lois Log-normal ou Weibull/Gamma pour les séries des débits minimum en été (MAM7). Pour chaque station de mesure, la sélection de distributions statistiques théoriques a été faite en fonction de la correspondance avec les quantiles observés et calculés.

Afin de caractériser l'évolution possible des changements futurs induits par le climat pour les hauts et bas débits de la Meuse, un facteur de changement climatique a été calculé sur les 9 stations mentionnées ci-dessus pour :

- les deux périodes 2021-2050 et 2071-2100,
- les scénarios climatiques transnationaux secs et humides
- les scénarios climatiques nationaux

Le facteur de changement climatique est défini comme : $Q_{simulé (scénario)} / Q_{simulé (climat actuel)}$. Par conséquent, une valeur supérieure à 1 signifie une augmentation de la valeur des débits actuels tandis qu'une valeur inférieure à 1 signifie une baisse de la valeur des débits actuels.

Le Tableau 2 indique les valeurs du facteur de changement climatique obtenu pour les 9 sous-bassins de la Meuse. Ces valeurs se rapportent aux deux scénarios climatiques transnationaux (France, Belgique, Allemagne et Pays-Bas) et aux deux principales variables hydrologiques : $Q_{hx_{100}}$ pour les crues et MAM7 pour les étiages.

		Meuse St-Mihiel	Meuse Stenay	Meuse Montcy	Meuse Chooz	Meuse Sint- Pieter	Lesse Gendron	Vesdre Chaufontaine	Rur Stah	Niers Goch
MAM7	2021- 2050	0,79 0,61	0,73 0,64	0,88 0,75	0,88 0,74	0,82 0,65	1,00 0,83	1,17 0,93	0,68 0,56	0,84 0,63
	2071- 2100	0,60 0,43	0,50 0,47	0,71 0,52	0,65 0,52	0,60 0,33	0,96 0,57	1,10 0,67	0,71 0,36	0,60 0,27
$Q_{hx_{100}}$	2021- 2050	1,12 0,96	1,12 0,96	1,12 0,96	1,12 0,96	1,14 0,95	1,19 0,98	1,08 0,90	1,02 0,88	1,11 0,89
	2071- 2100	1,27 0,89	1,27 0,89	1,27 0,89	1,27 0,89	1,33 0,91	1,55 0,90	1,27 0,81	1,10 0,61	1,24 0,71

Tableau 2. Facteurs de changement climatique obtenus pour les variables MAM7 et $Q_{hx_{100}}$, scénarios climatiques humides et secs.

Une augmentation attendue des débits de crue pour le scénario climatique humide

Pour le scénario climatique transnational, l'évolution des débits de crue est quasi-homogène sur tout le bassin. Une augmentation des débits est envisagée pour le scénario humide et une réduction pour le scénario sec. Ces tendances sont plus prononcées pour la fin du siècle.

Des étiages plus importants quel que soit le scénario climatique envisagé

Les facteurs de changement climatique basés sur le MAM7 ont également été calculés : les débits minimum ont tendance à baisser d'avantage pour les deux scénarios, sauf dans la partie wallonne de la Meuse où une légère augmentation a été calculée pour le scénario climatique humide. Les tendances sont accentuées pour la seconde période de simulation (2071-2000).

Un manque de connaissances sur les précipitations extrêmes pour les petits bassins.

L'une des principales lacunes du projet AMICE est l'étude des précipitations extrêmes sur les petits bassins. Des précipitations extrêmes concentrées sur des secteurs très localisés peuvent créer des coulées de boues dévastatrices, entraînant de graves dommages au niveau local. Contrairement aux grandes inondations, qui arrivent le plus souvent en hiver, les précipitations extrêmes peuvent se produire à tout moment de l'année.

Ce phénomène étant très complexe à comprendre et à simuler, les connaissances actuelles ne permettent que de dire que ces précipitations extrêmes pourraient être plus fréquentes au cours de ce siècle.

ACCORD SUR LES SCÉNARIOS HYDROLOGIQUES FUTURS

Augmentation des débits en hiver – baisse des débits en été

Les partenaires du projet AMICE se sont rencontrés le 11 mars 2010 à l'Université de Metz pour discuter des résultats et les présenter devant un panel d'experts du bassin de la Meuse.

D'après les résultats du tableau 2 et la représentativité des affluents de la Meuse, des experts ont été consultés pour définir les scénarios hydrologiques applicables à l'ensemble du bassin de la Meuse. Les partenaires du projet se sont finalement mis d'accord sur les scénarios hydrologiques les plus extrêmes, qui sont extraits du scénario climatique transnational humide pour les hautes eaux et du scénario climatique transnational sec pour les basses eaux.

Voici ces scénarios hydrologiques extrêmes :

- Hausse des valeurs de $Q_{hx_{100}}$ de **+15% pour 2021-2050** et **+30% pour 2071-2100**
- Baisse des valeurs de $MAM7$ de **-10% pour 2021-2050** et **-40% pour 2071-2100**

Ces scénarios hydrologiques seront utilisés par les partenaires impliqués dans les prochaines actions, en particulier celle consacrée à la modélisation hydraulique (Ac6) qui a déjà commencé et qui est coordonnée par l'Université de Liège (ULg-HACH).

Afin de renforcer les résultats obtenus dans le cadre du projet AMICE, les partenaires se sont mis d'accord sur le besoin de comparer les scénarios climatiques d'AMICE avec les résultats du projet européen FP6 ENSEMBLES dont l'objectif était de quantifier l'incertitude des projections à long-terme sur le changement climatique.

Titre	Analyse du changement climatique, des scénarios de crue et d'étiage sur le bassin de la Meuse Rapport WP1 – actions 1-3
Auteurs	Drogue G., Fournier M., Bauwens A., Buiteveld H., Commeaux F., Degré A., De Keizer O., Detrembleur S., Dewals B., François D., Guilmin E., Hausmann B., Hissel F., Huber N., Lebaut S., Losson B., Kufeld M., Nacken H., Piroton M., Pontégnie D., Sohier C., Vanneuville W.
Date	2010-06-07
Partenaire dirigeant	EPAMA
Partenaires impliqués	UPVM, CETMEF, FHR, RWTH, RWS, ULg-HACH, ULg-Gx-ABT
Lot de travail	1
Actions	1-3

AMICE Adaptation de la Meuse aux Impacts des Evolutions du Climat

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

Le changement climatique a une influence sur le bassin de la Meuse en créant plus d'inondations et de sécheresse. Les gestionnaires du fleuve et les experts du domaine de l'eau issus de 4 pays du bassin unissent leurs forces dans ce projet transnational financé par l'Europe pour élaborer une stratégie innovante et durable. Le projet dure de 2009 à 2012. Pour avoir plus d'informations sur le projet, vous pouvez consulter : www.amice-project.eu

Le Programme INTERREG IV ENO

Le Programme finance des actions transnationales innovantes permettant une meilleure gestion des risques et des ressources naturelles, l'amélioration des moyens de communication et le renforcement des communautés en Europe du Nord-Ouest. Pour avoir plus d'informations sur le programme, vous pouvez consulter : www.nweurope.eu

