



## Aléa climatique et débits des cours d'eau dans le bassin transnational de la Meuse.

Co-variabilité, changements possibles et impact sur les débordements

*Soutenance de thèse de cotutelle*  
Présentée par **Benjamin GRELIER**

*Réalisée en co-tutelle sous la direction de :*

**Gilles DROGUE**, MCF-HDR (*Université de Lorraine*)  
et **Michel PIROTON**, Professeur (*Université de Liège*)

*Metz, 1<sup>er</sup> décembre 2017*

# Contexte



## Changement climatique (CC)

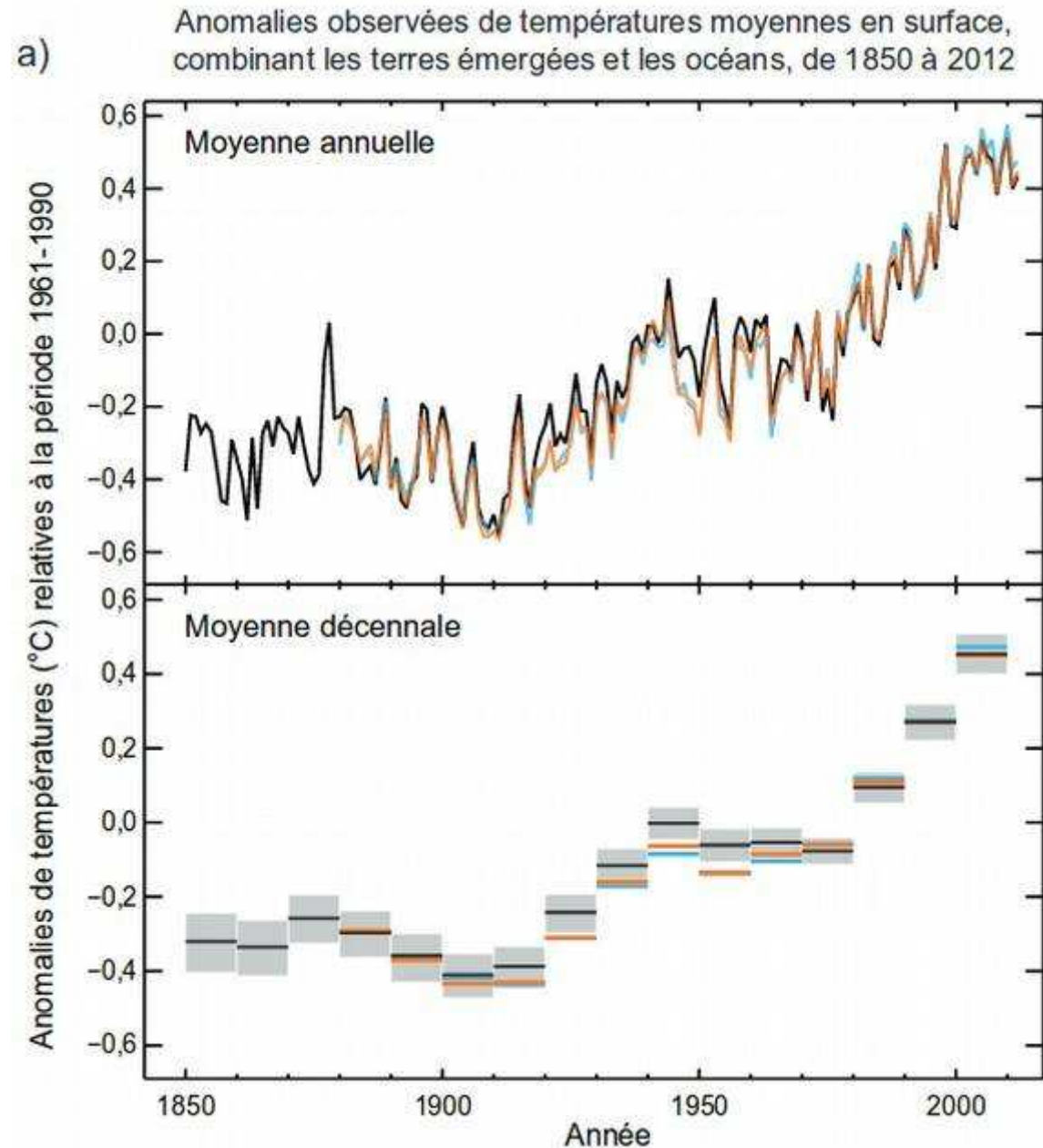
« Le réchauffement du système climatique est sans équivoque [...] »

(Résumé à l'intention des décideurs, 5<sup>ème</sup> rapport du GIEC – Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2013)

## Phénomène d'échelle planétaire



**Prise en compte nécessaire**



## Prise en compte du CC dans les documents de gestion des risques hydrologiques : une problématique émergente

Extrait du Plan de Gestion des Risques Inondations (PGRI) du district Meuse, version 2016-2021 (116 pages)

Lorsque des constructions nouvelles sont autorisées en zone inondable :

- des mesures compensatoires et/ou correctrices sont prescrites afin de ne pas aggraver l'aléa en aval ou en amont de la construction ; l'efficacité de ces mesures est évaluée par une étude globale, la responsabilité de leur mise en œuvre pourra incomber à la collectivité / aux collectivités concernée(s).
- des prescriptions visant à réduire au maximum la vulnérabilité du bâtiment en question sont définies.

a) Elles visent à imposer notamment :

- le premier niveau de plancher habitable implanté au dessus de la cote de référence, elle-même augmentée d'une marge de sécurité ;
- l'installation des équipements vulnérables au dessus de la cote de référence, elle-même augmentée d'une **marge de sécurité**.

Cette marge de sécurité doit permettre de prendre en compte les phénomènes de remous et les incertitudes des modèles mathématiques, en particulier pour les constructions présentant un fort enjeu. **A l'occasion de l'élaboration de tout nouveau PGRI ou lors de leur révision, cette marge de sécurité pourra prendre en compte l'évolution prévisible de la cote de référence liée aux effets du changement climatique.** De l'ordre de 30 cm en l'absence d'étude spécifique, cette marge de sécurité pourra être redéfinie si des études locales permettent d'évaluer l'impact du changement climatique sur la cote de référence du cours d'eau.



Initiatives encore timides...



Comment renforcer cette dynamique ?

À partir de quelle connaissance de l'aléa climatique ?

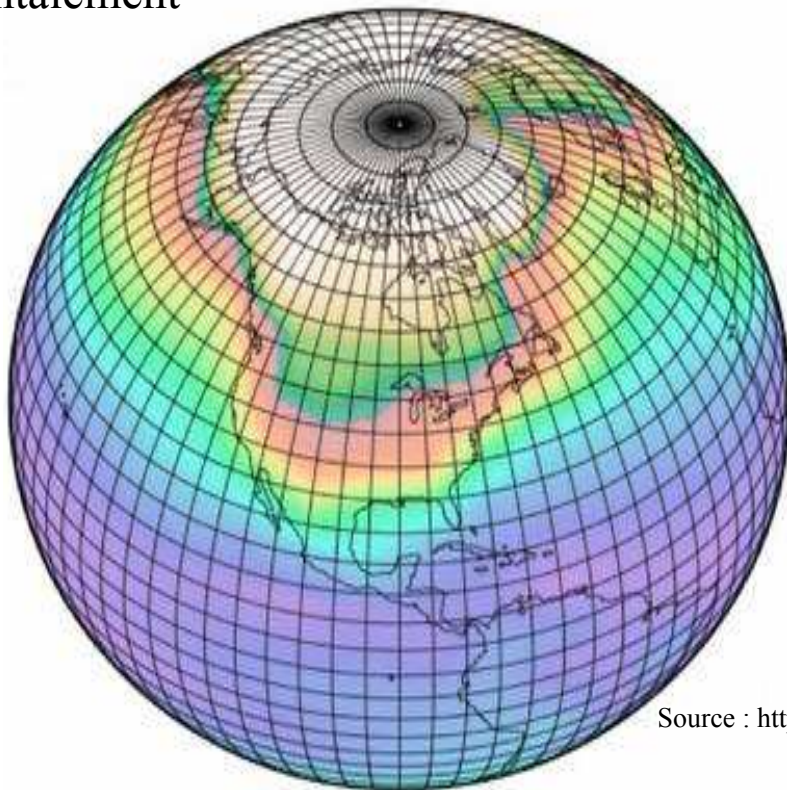
## Comment évalue-t-on le climat futur ?

Modèles climatiques de circulation générale (MCG)

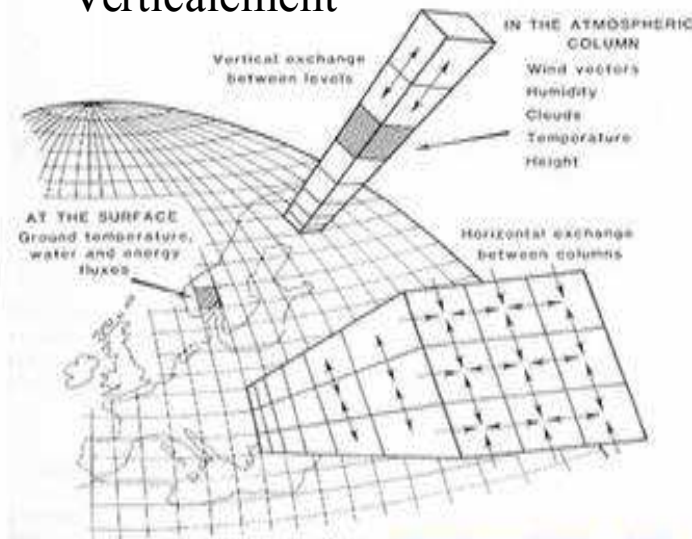
→ découpage de l'atmosphère en mailles 3D

→ équations et échanges résolus à chaque maille et chaque pas de temps

Horizontalement



Verticalement



(Henderson-Sellers, 1985)

Source : [https://serc.carleton.edu/eet/envisioningclimatechange/part\\_2.html](https://serc.carleton.edu/eet/envisioningclimatechange/part_2.html)

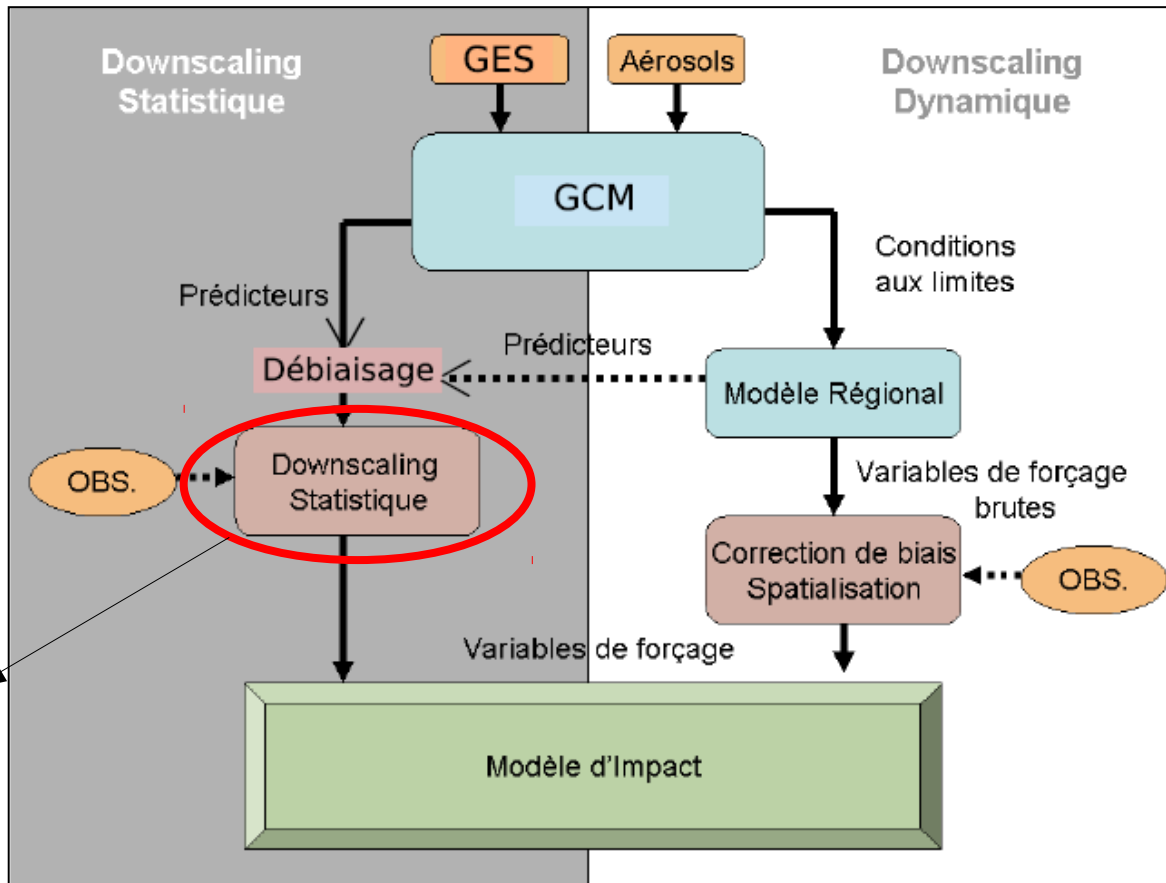


MCG : mailles très large ( $\approx 100$  km)

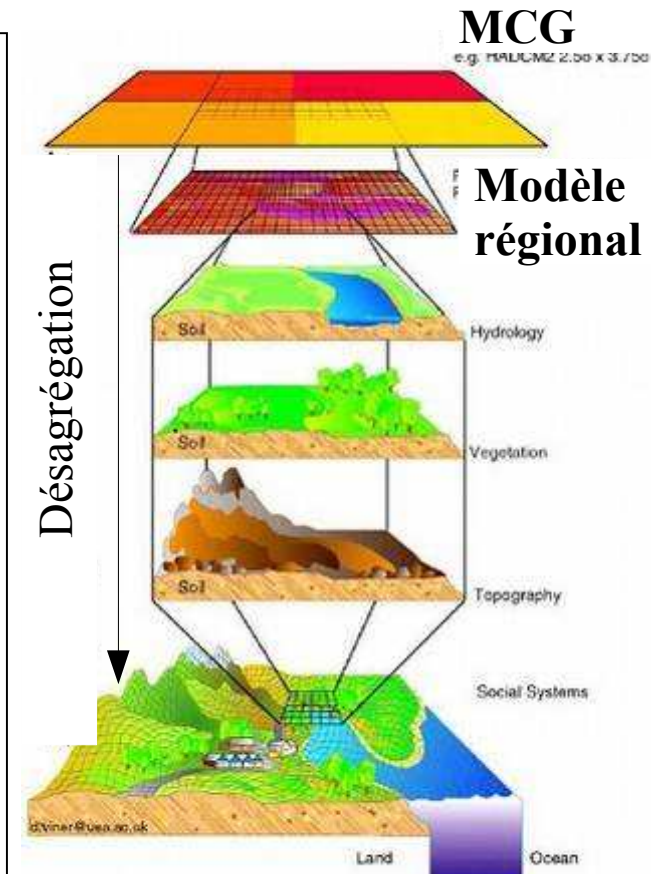
Nécessitent technique pour **régionaliser** les projection à un **domaine réduit**

# Comment évalue-t-on le climat futur ?

## Régionalisation : 2 grands types de techniques de désagrégation



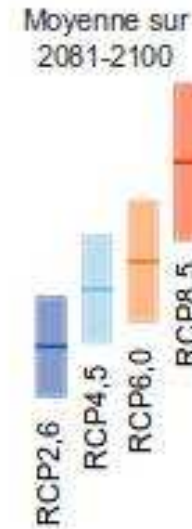
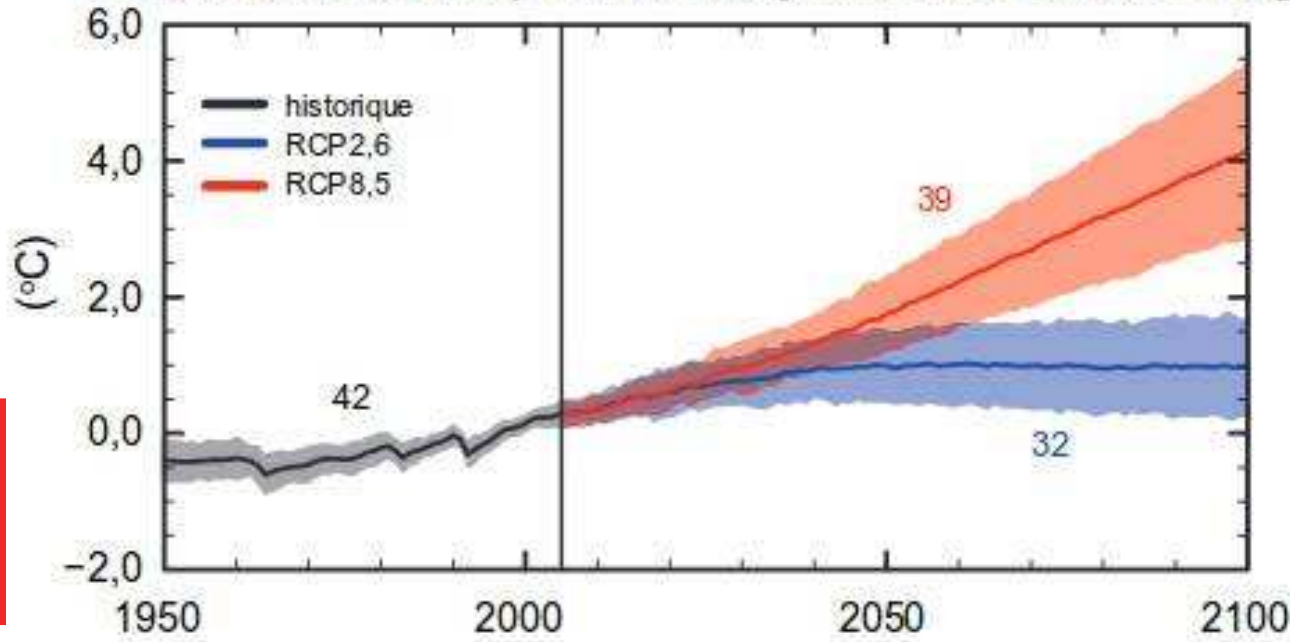
In Lafaysse, 2011



# Changement climatique



Évolution de la température moyenne à la surface du globe (GIEC, 2013)



**Incertitudes fortes !**

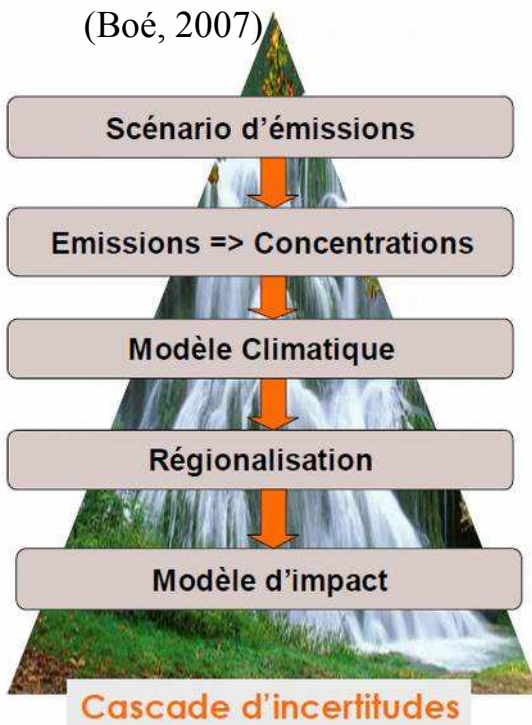
RCP : Radiative Concentration Pathway → scénarios radiatifs utilisés dans l'expérience CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project – Phase 5) et le rapport du GIEC (2013)

D'un point de vue des **décideurs/gestionnaires locaux**, inaction par **peur de se tromper en agissant** (Brown et Wilby, 2012) :



**Quel aléa climatique prendre en compte ???**

## Incertitudes du CC dans les études d'impact



### Cascade d'incertitudes

(Drias, les futurs du climat, Pagé et al, 2008)

- **Réflexive**  
→ scénarios socio-économiques retenus
- **Épistémique**  
→ connaissances et représentations imparfaites des systèmes étudiés
- **Stochastique**  
→ variabilité naturelle du système climatique
- **"Technique"**  
→ méthodes et outils employés

« **Bonne incertitude** » : celle que l'on veut maximiser pour ne pas passer à côté de climats possibles

- Fortes incertitudes → **inaction**/problème d'ineffectivité des politiques publiques
- Scénarios climatiques ont **une valeur prédictive (i.e. conditionnante)** pour l'étude d'impact
- Vulnérabilité comme **point d'arrivée**
- Changement climatique anthropique futur vu comme une **surprise climatique prévisible** → risque de ne pas prendre en compte tous les changements climatiques possibles dans l'étude d'impact



**Quelle approche pertinente pour l'hydrologie des cours d'eau ?**



# Problématique

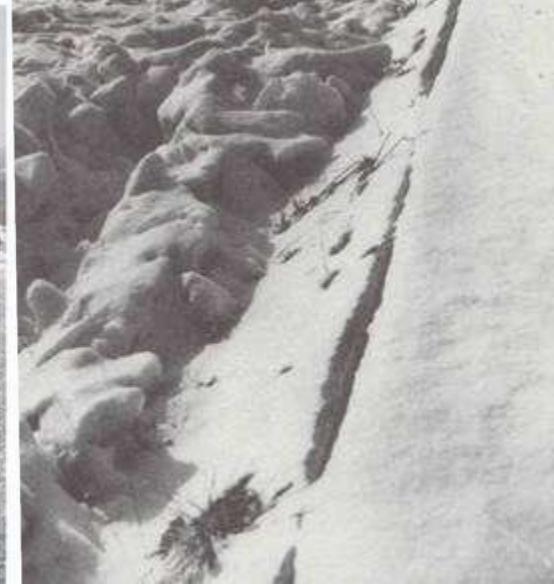


# Problématique

## Variabilité climatique

Variabilité naturelle

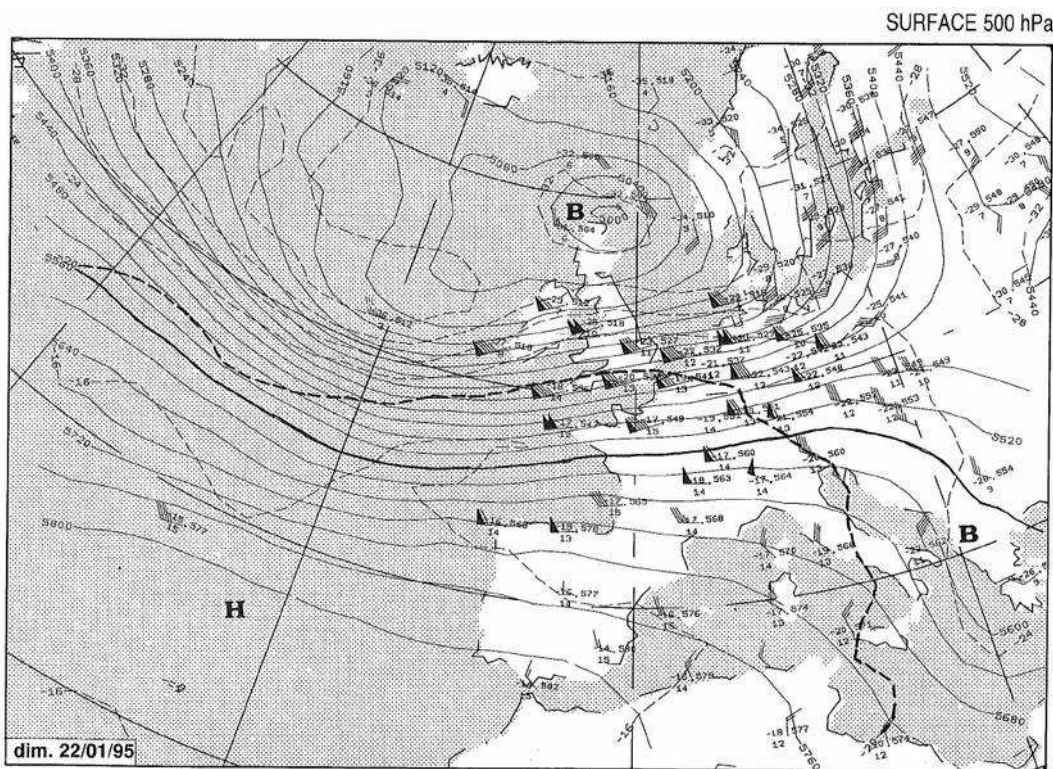
Cycles saisonniers, annuels, pluri-annuels



## Liens entre circulation atmosphérique générale et variabilité hydroclimatique dans le secteur Nord-Atlantique Europe

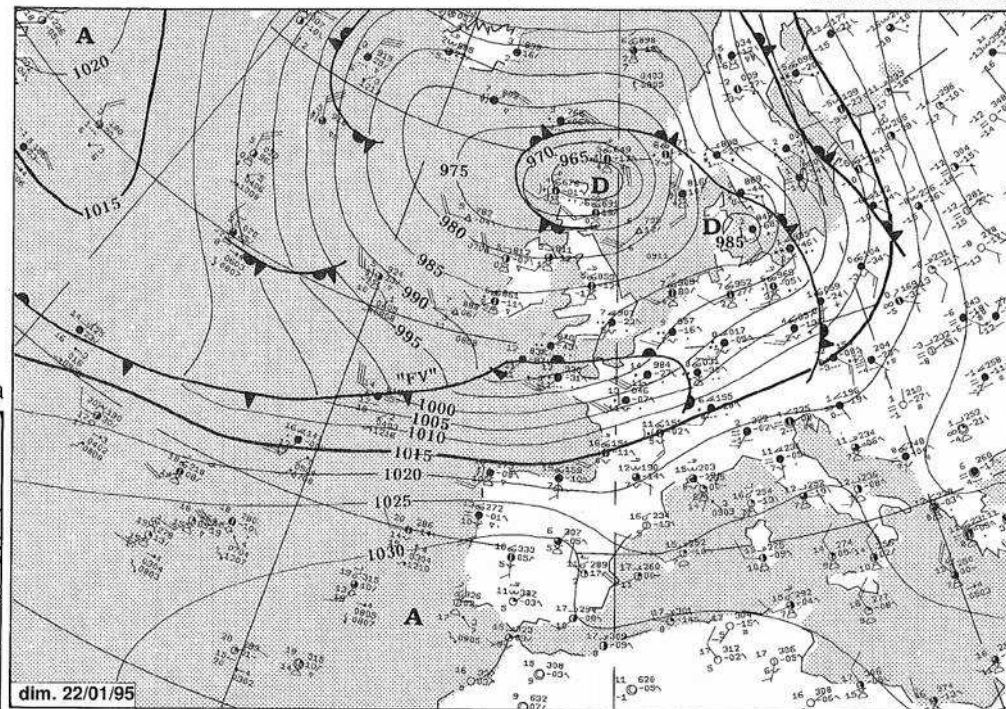
ex. 22/01/1995

Carte synoptique en **altitude**



Dimanche 12 h TU

ANALYSE EN SURFACE



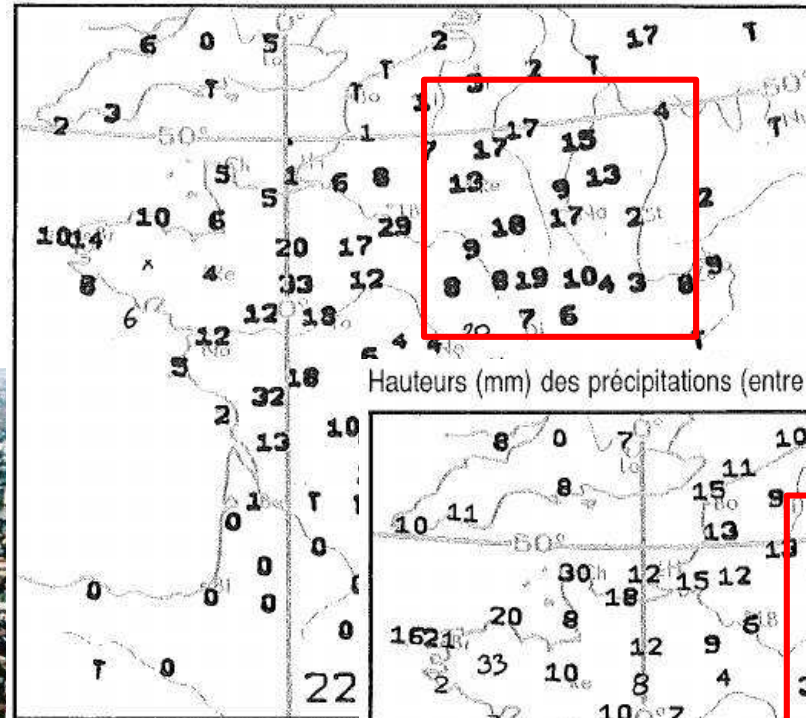
Carte synoptique en **surface**

## Liens entre circulation atmosphérique générale et variabilité hydroclimatique dans le secteur Nord-Atlantique Europe

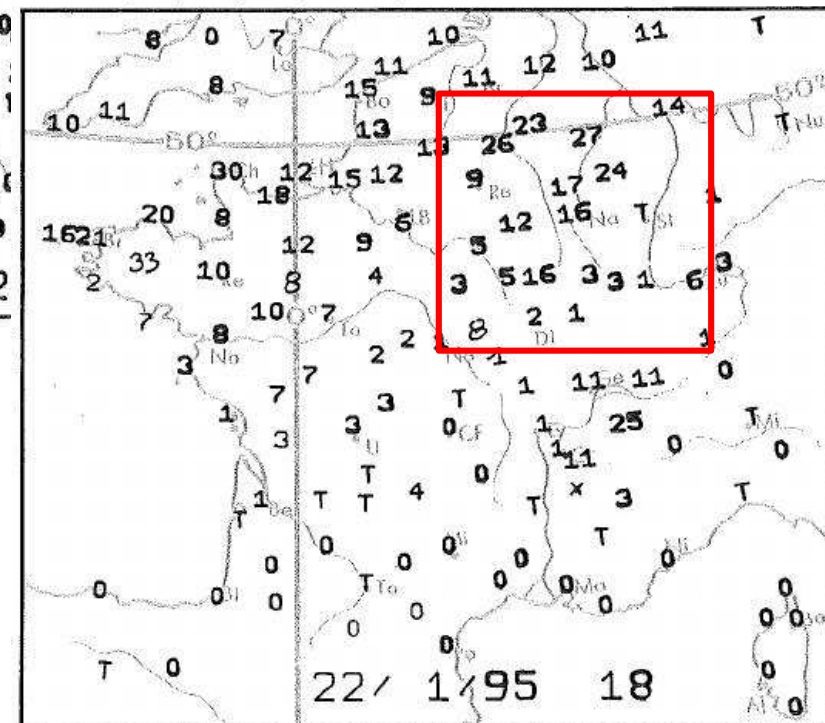
### Précipitations le 21 et le 22 janvier 1995



Hauteurs (mm) des précipitations (entre 18 h TU la veille et 6 h TU)



Hauteurs (mm) des précipitations (entre 6 h TU et 18 h TU)



Inondations catastrophiques à Charleville-Mézières

## Risques d'origine hydrologiques



## Étiages



Une des pertes de la Meuse (Bazoilles/Meuse été 2012)  
Source : site web de l'académie Nancy-Metz



Crue de janvier 1995, Charleville-Mézières  
Source : site web de l'EPAMA

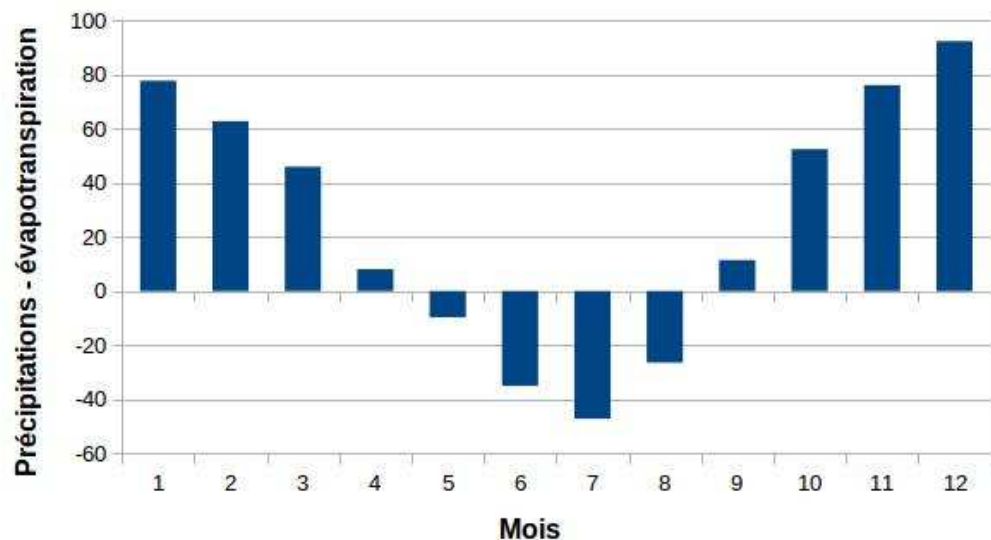


Crue de décembre 1993, Wallonie  
Source : sudinfo.be

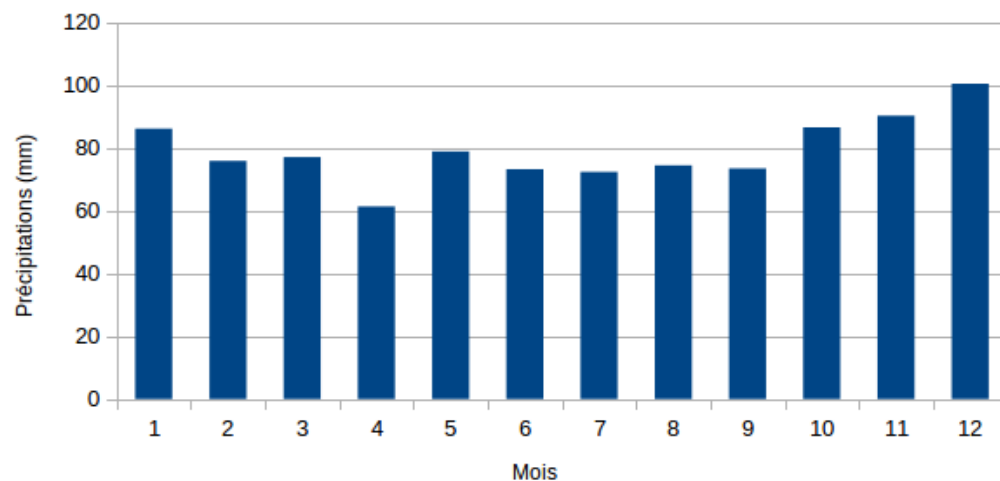
## Inondations

## Régimes climatiques et hydrologiques

Précipitations – évapotranspiration potentielle

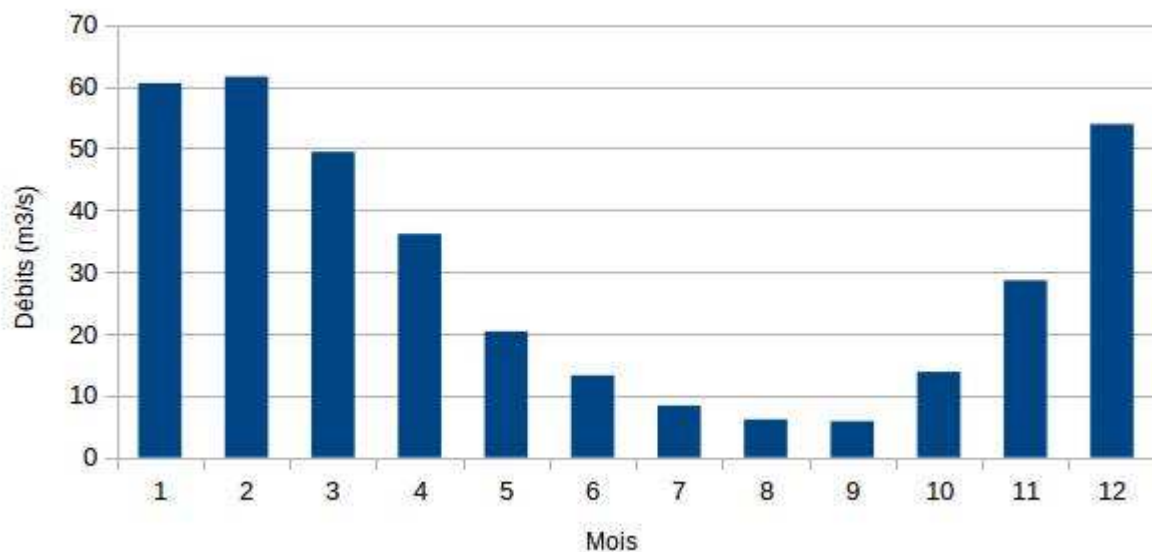


Précipitations moyennes mensuelles



(données 1971-2010)

Débits moyens mensuels



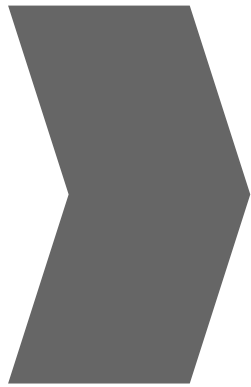
**Bassin de la Meuse à  
Saint-Mihiel**

**Régime pluvio-évaporal**

+ caractéristiques  
intrinsèques du BV

## Liens entre dynamique atmosphérique et variabilité hydroclimatique

**Postulat :**



**Les fluctuations hydroclimatiques naturelles sont pilotées à différents pas de temps (événementiel, interannuel, décennal, etc.) par la circulation atmosphérique générale et modulées localement par les caractéristiques physiques des bassins versants**

**L'étude du changement climatique sur la circulation atmosphérique générale constitue donc un point de départ pertinent de l'étude d'impact du changement climatique sur l'hydrologie des cours d'eau**

**Risques d'origine hydrologiques dans le bassin transnational de la Meuse**

*vs*

**Changement climatique global et futur**



**Que proposer aux gestionnaires de l'eau et des milieux aquatiques pour prendre en compte les effets du changements climatiques sur les risques d'origine hydrologique ?**

## **Thèse**

- ▶ Décrire la circulation atmosphérique générale dans la zone géographique d'intérêt
- ▶ Reconstituer sa variabilité sur le long terme (intégrant la variabilité observée et future)
- ▶ Transférer l'effet des changements de circulation aux crues et aux étiages à une échelle spatiale hydroclimatiquement pertinente (i.e. celle du bassin versant)



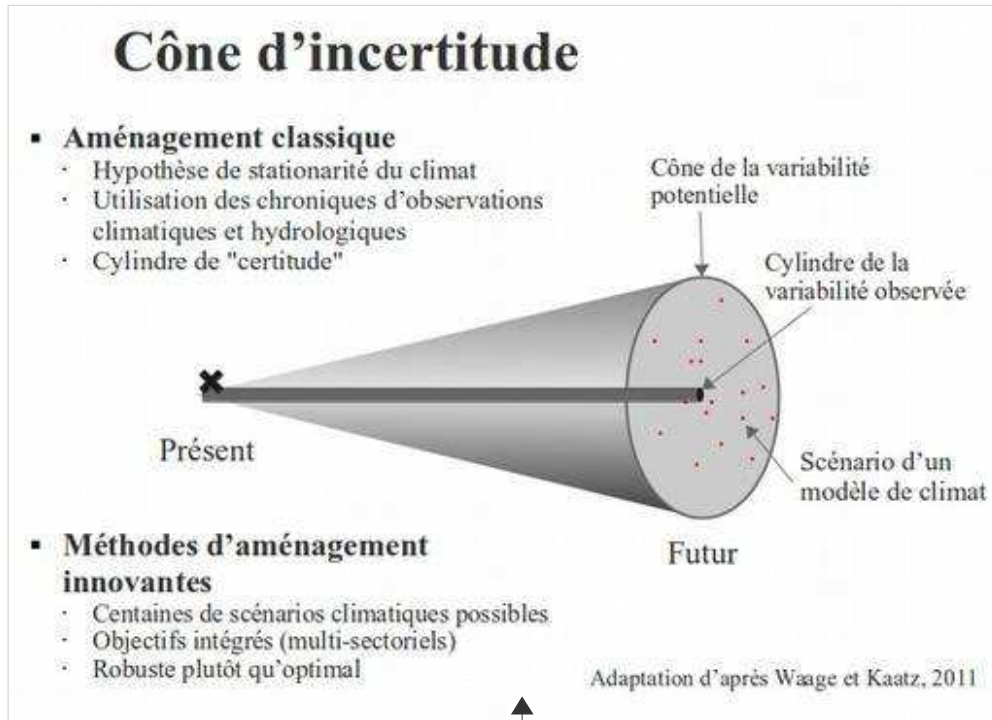
# Cadre méthodologique



# Cadre méthodologique

Échantillonner le changement climatique sur le long terme en combinant variabilité climatique passée-présente-future pour rendre l'étude d'impact **plus robuste**

D'une approche déterministe prédictive (*i.e.* un ou peu de scénarios climatiques)...



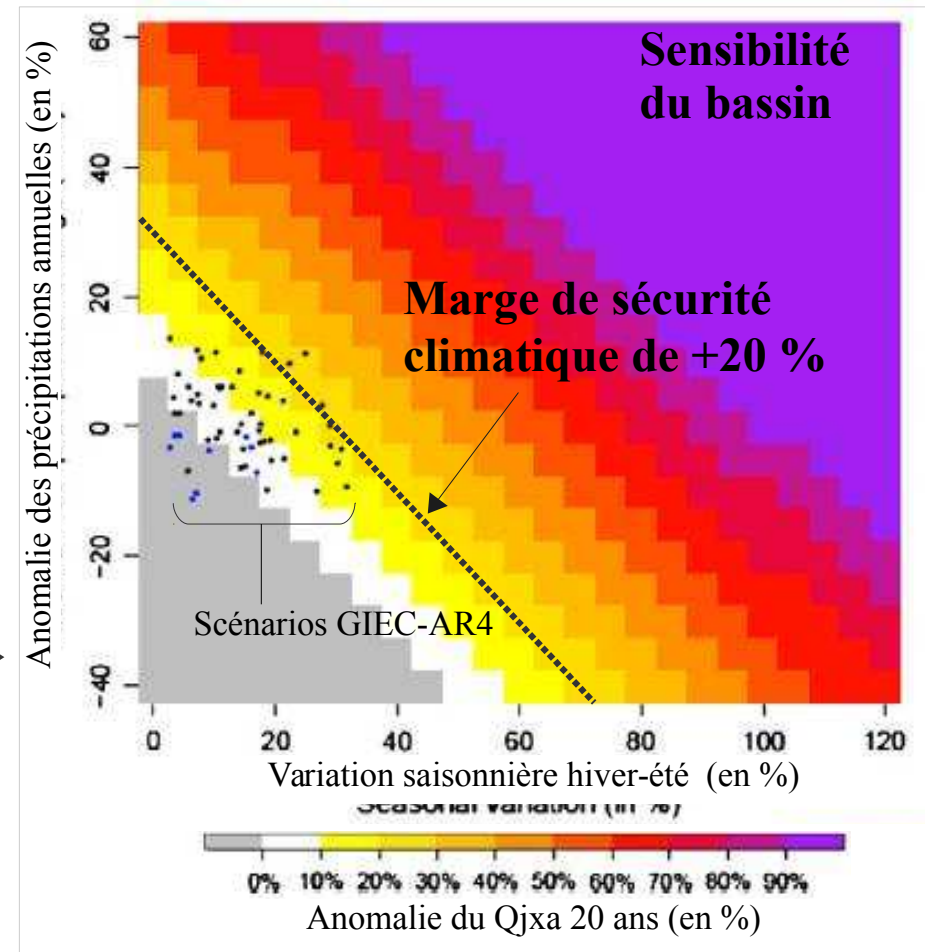
... à une approche prenant en compte la dispersion de la variabilité climatique potentielle (*i.e.* un grand nombre de scénarios).

## Requalification des scénarios MCG

**Valeur informative plutôt que prédictive**

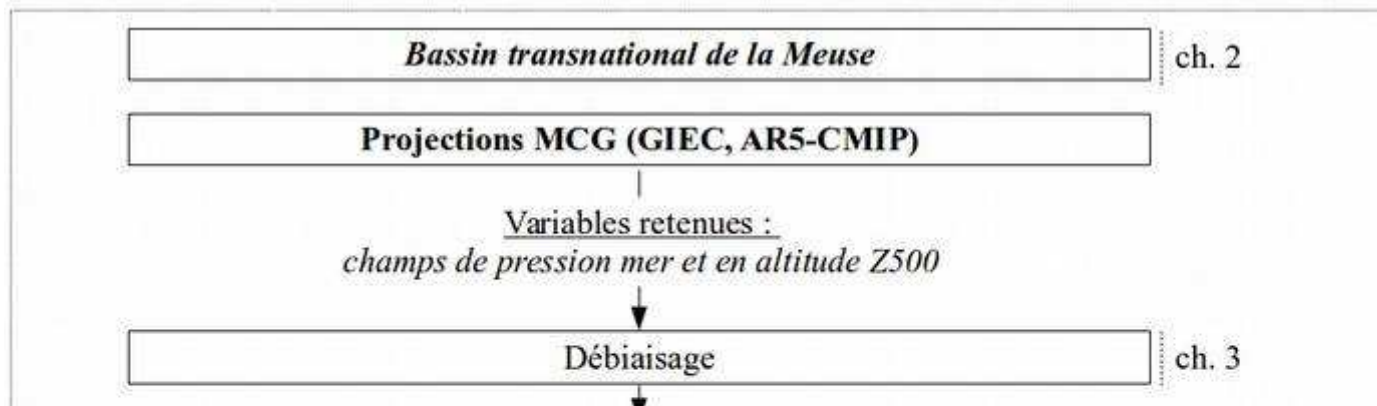
*scenario-neutral*

Prudhomme et al, 2010





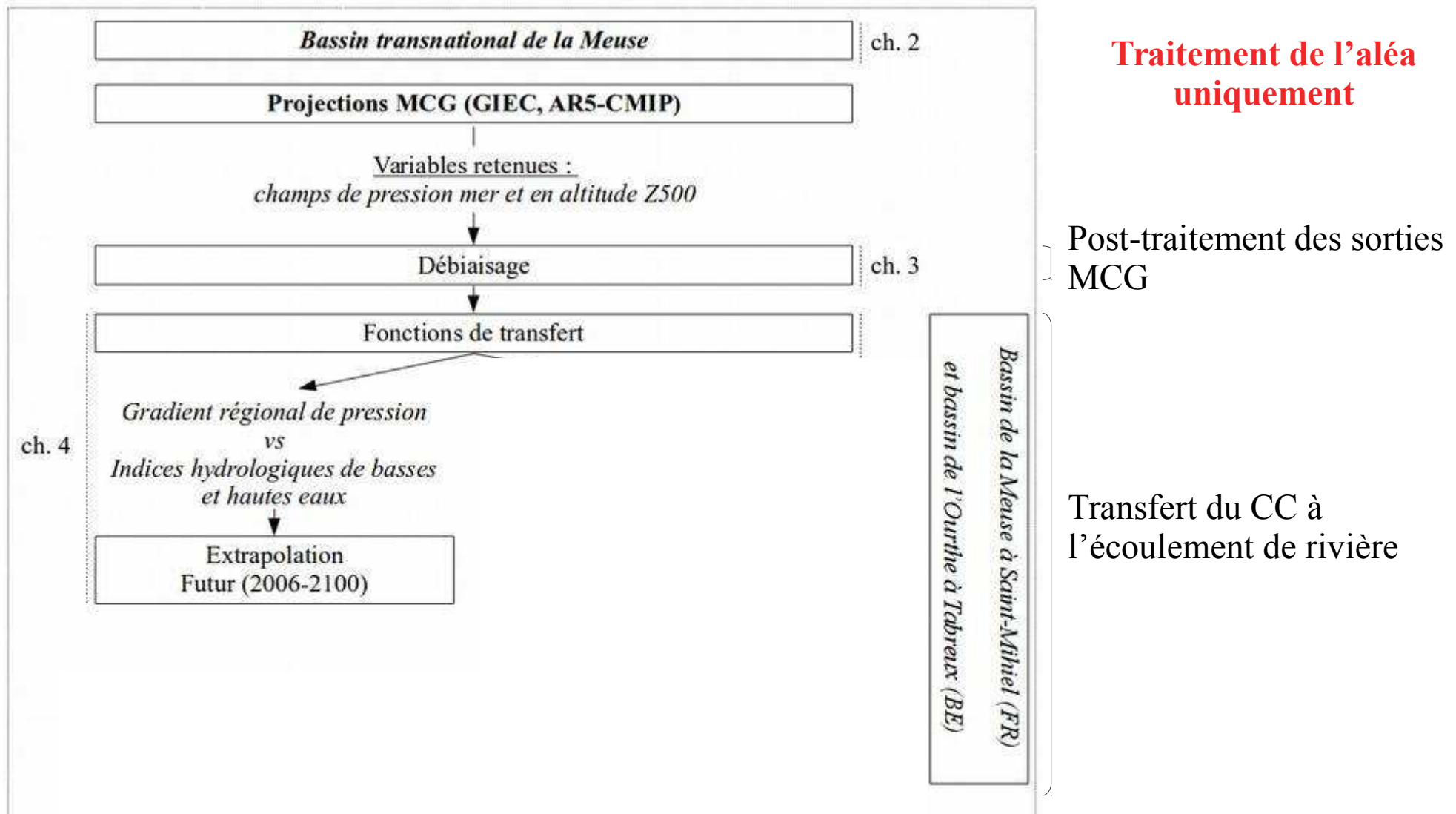
# Cadre méthodologique



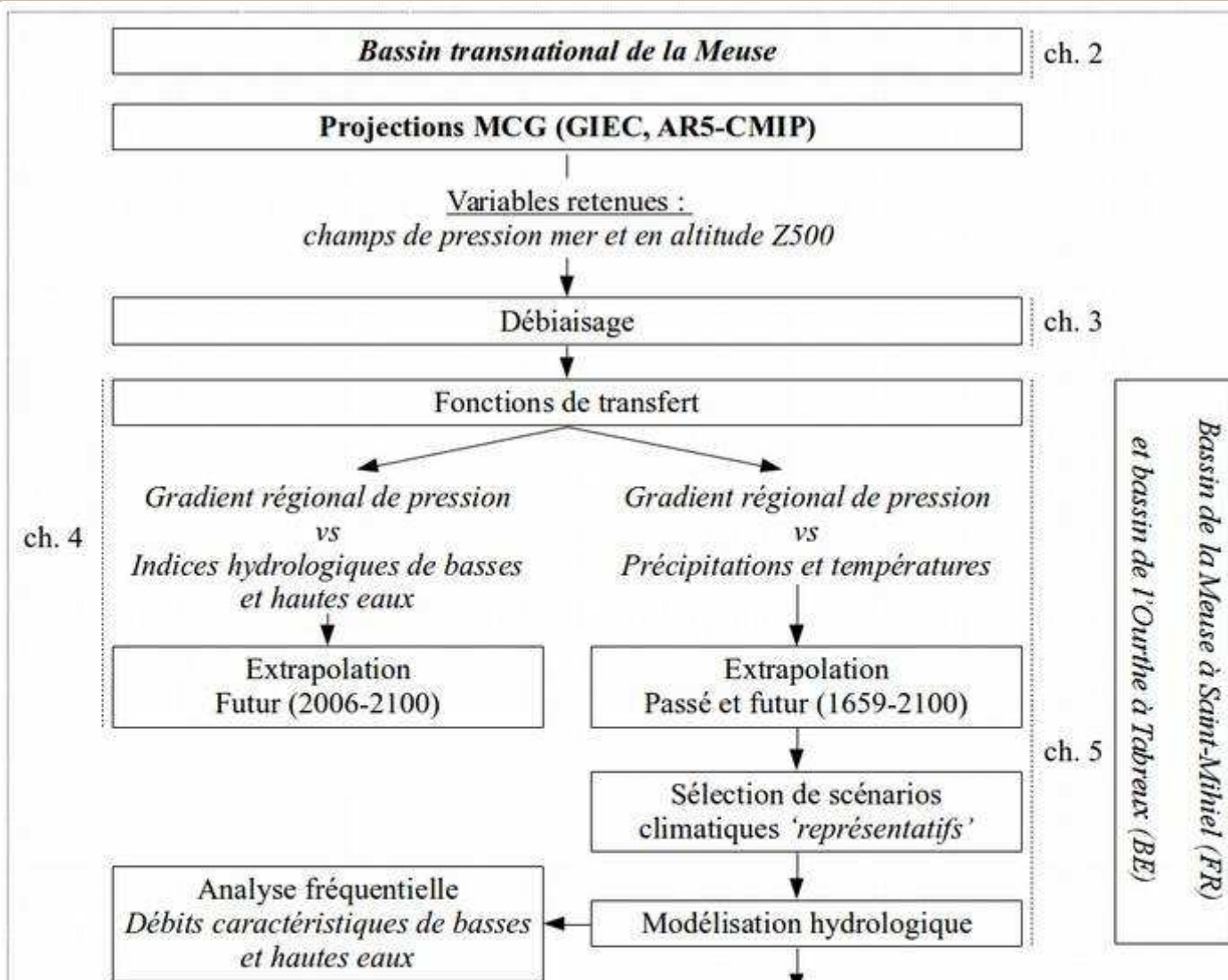
**Traitement de l'aléa  
uniquement**

Post-traitement des sorties  
MCG

# Cadre méthodologique



# Cadre méthodologique

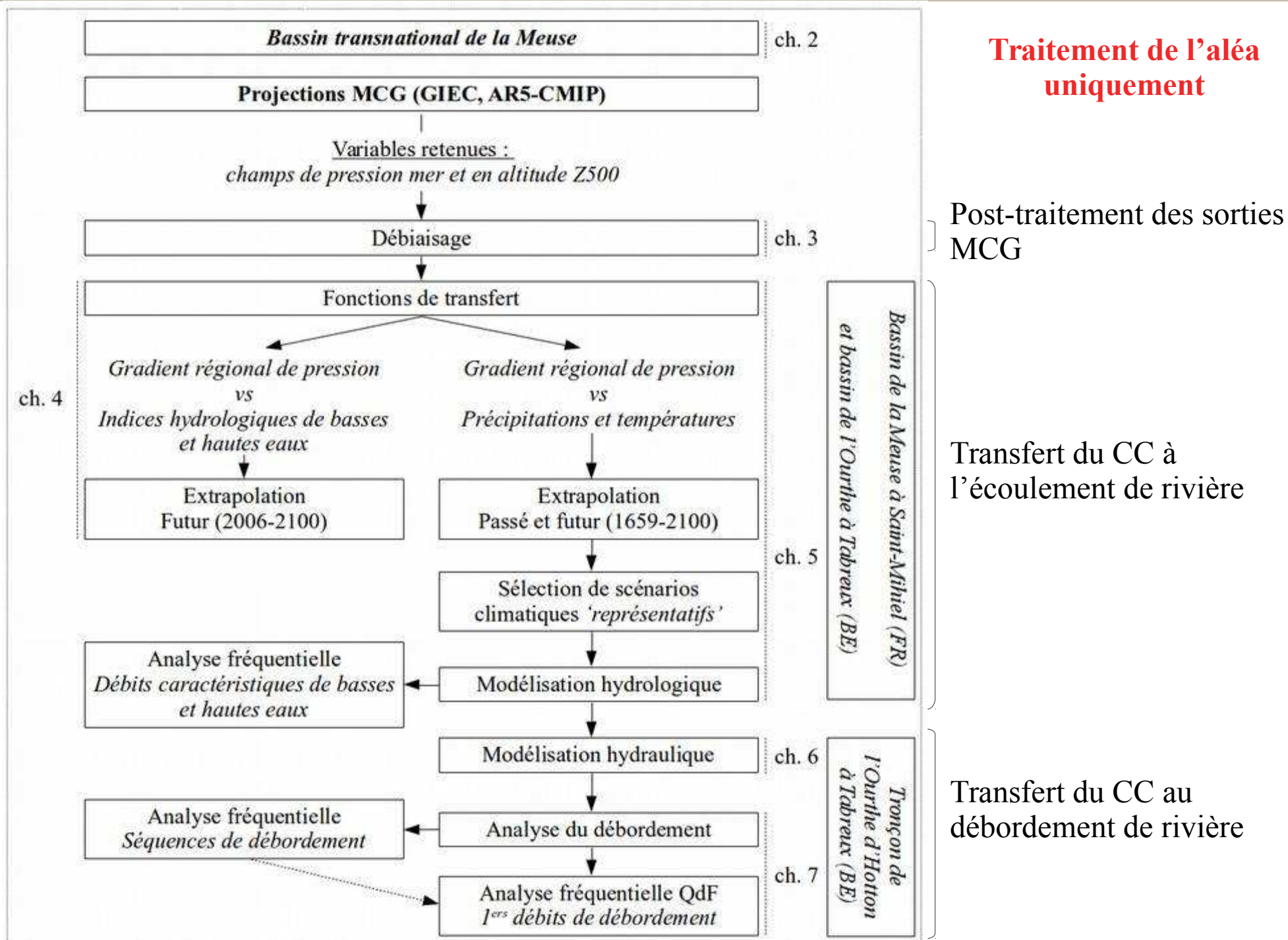


Traitement de l'aléa  
uniquement

Post-traitement des sorties  
MCG

Transfert du CC à  
l'écoulement de rivière

# Cadre méthodologique



# Cadre géographique





## Bassin de la Meuse

→ **bassin transnational**



### Surfaces de bassins

<b>Meuse</b>	<b>32000 km<sup>2</sup></b>
Rhin	185000 km <sup>2</sup>
Seine	79000 km <sup>2</sup>
Loire	117000 km <sup>2</sup>
Rhône	95000 km <sup>2</sup>
Garonne	55000 km <sup>2</sup>
Tamise	13500 km <sup>2</sup>

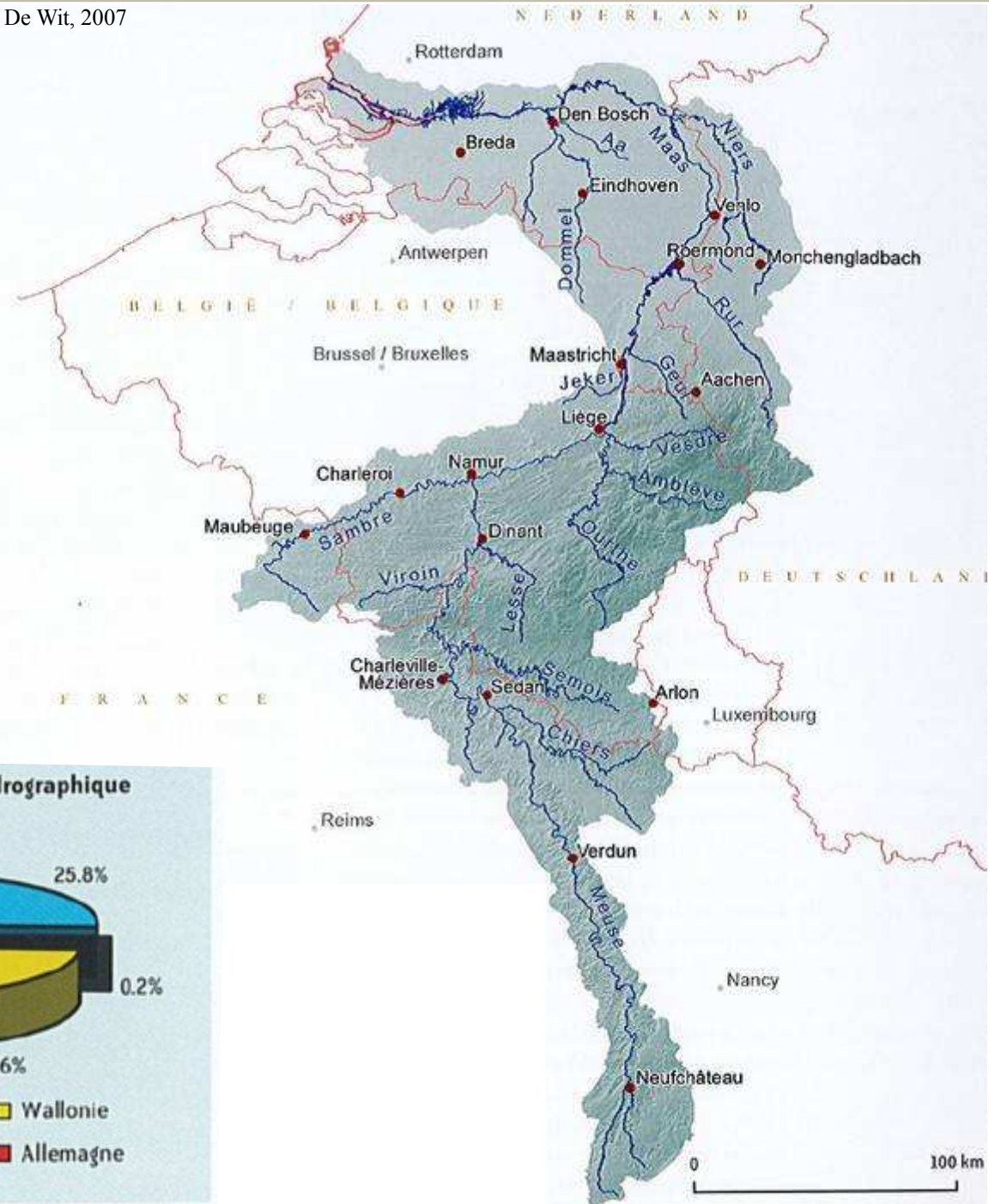
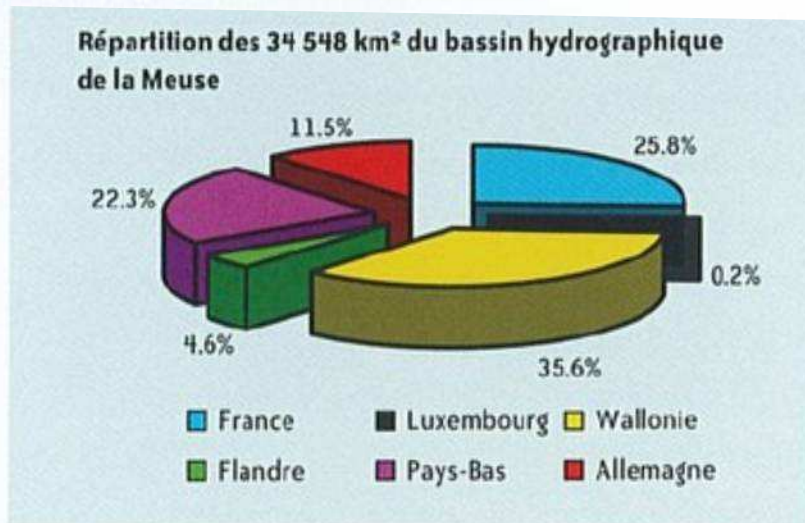
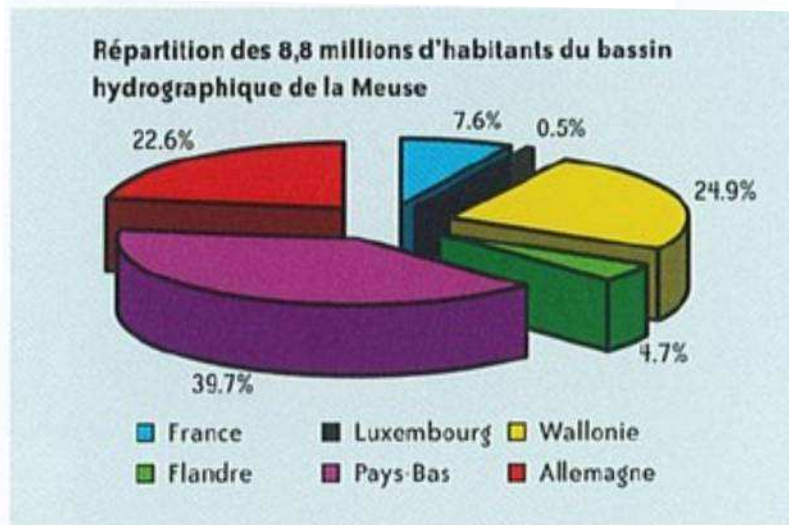
**Les bassins versant (BV) des fleuves européens**

# Cadre géographique

Source : De Wit, 2007

## Bassin de la Meuse

→ bassin transnational

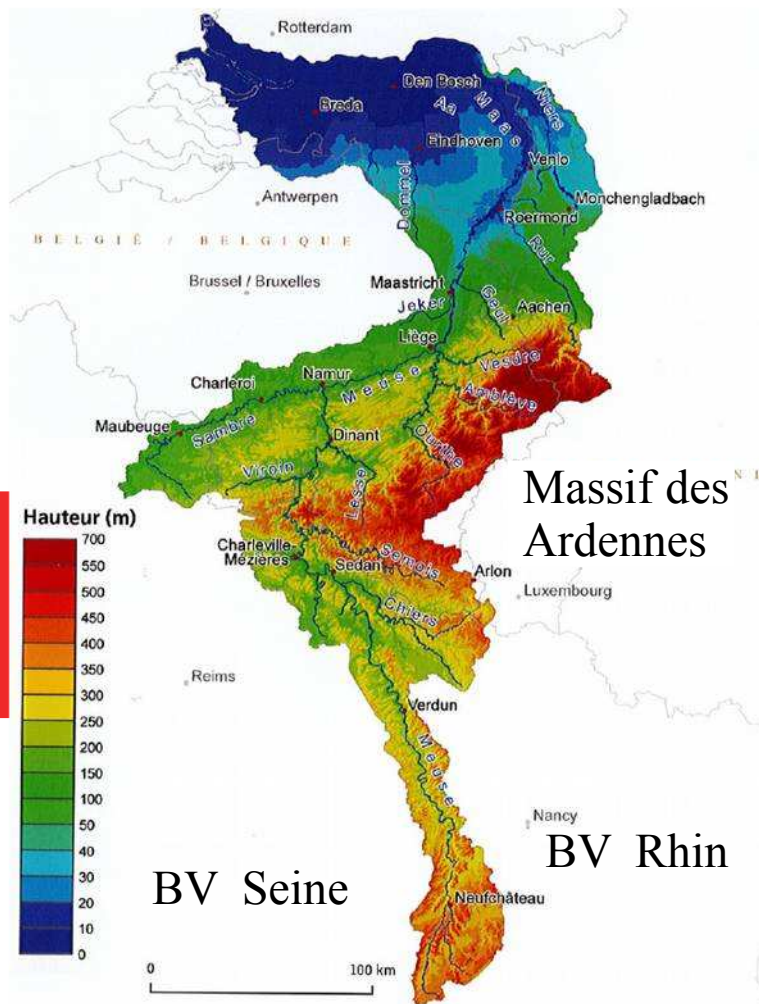


# Cadre géographique

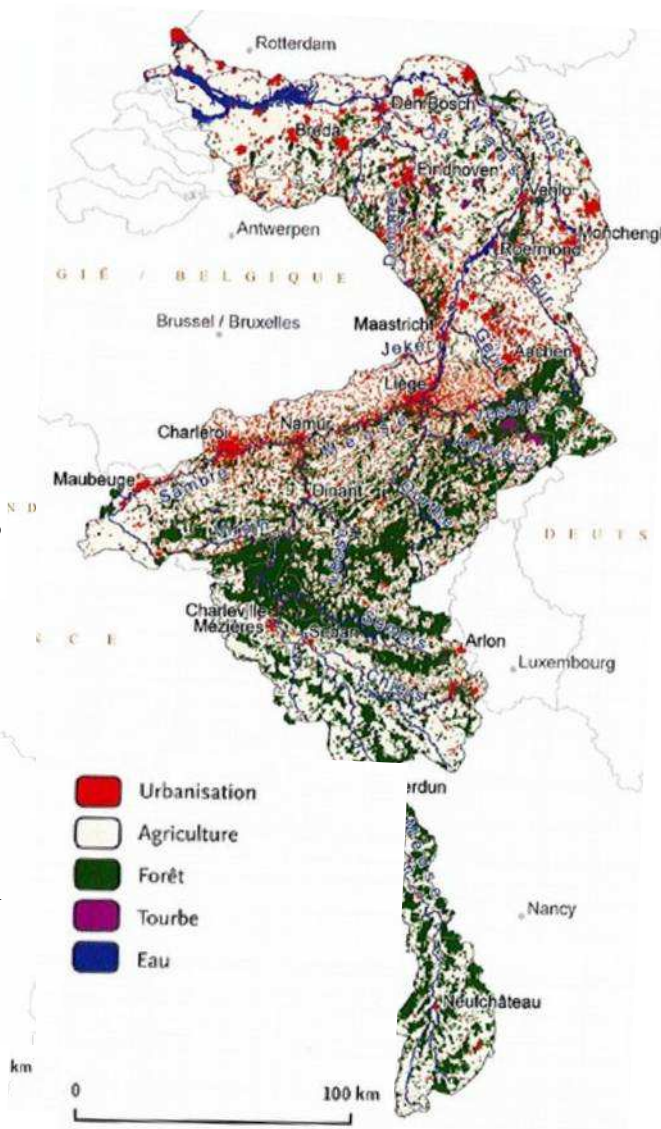
Source : De Wit, 2007

## Bassin de la Meuse

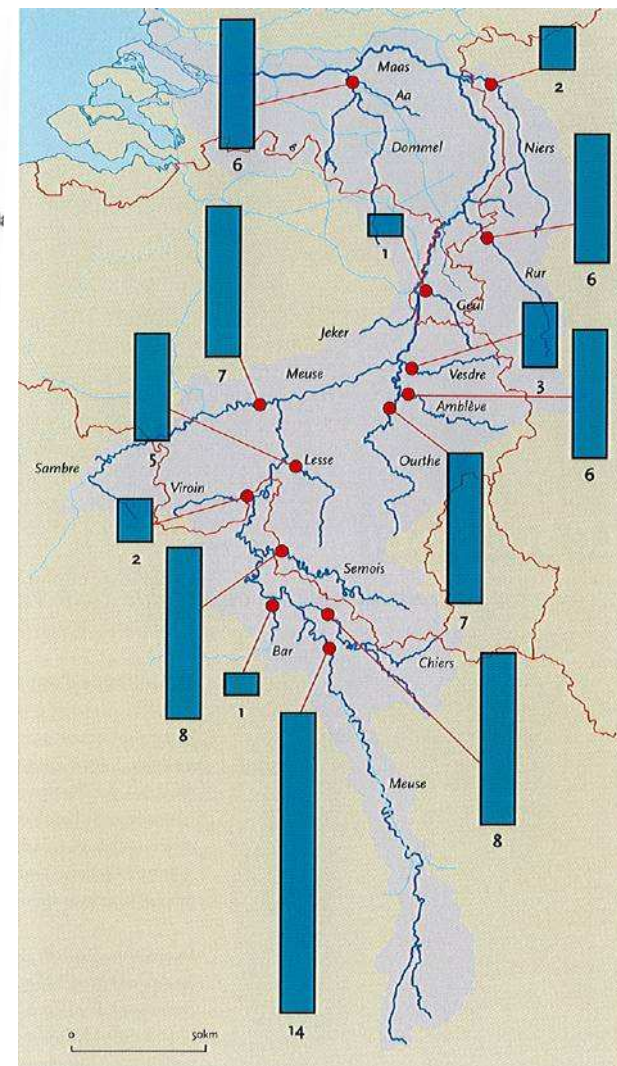
### Relief



### Occupation du sol

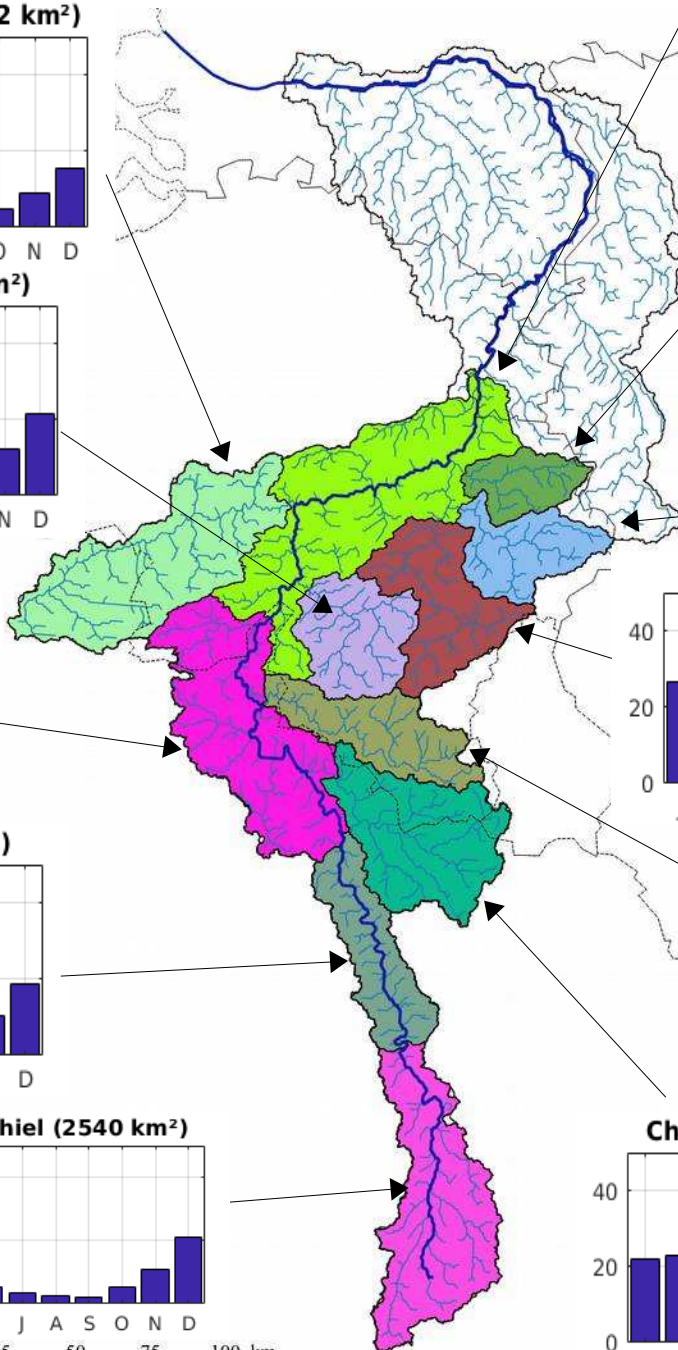


### Réseau hydrographique

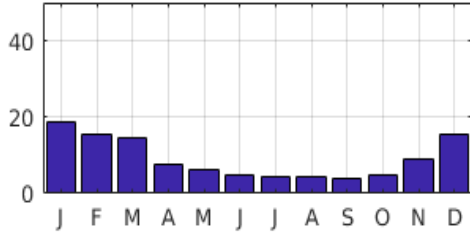


# Cadre géographique

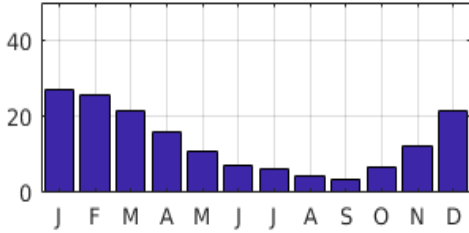
Sources des données :  
 -BV français : Banque Hydro  
 -BV belges : Direction générale opérationnelle de la Mobilité et des Voies hydrauliques de Wallonie



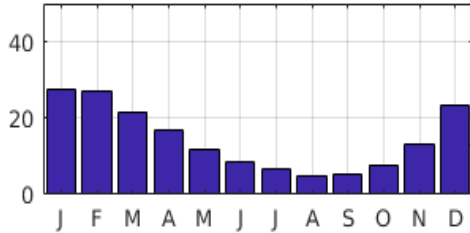
**Sambre à Salzinnes (2542 km<sup>2</sup>)**



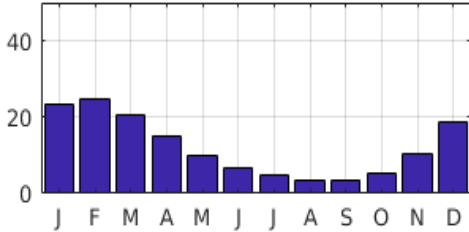
**Lesse à Gendron (1286 km<sup>2</sup>)**



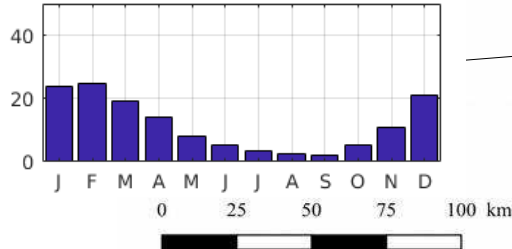
**Meuse à Chooz (10120 km<sup>2</sup>)**



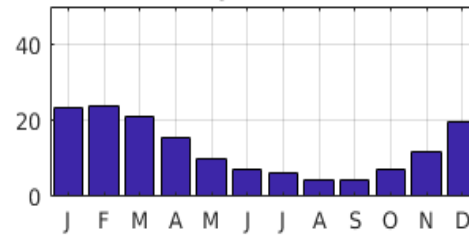
**Meuse à Stenay (3904 km<sup>2</sup>)**



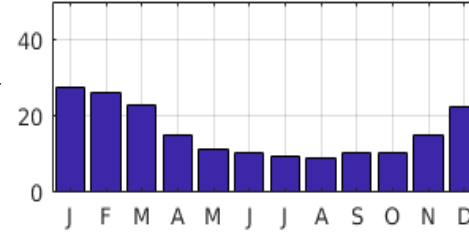
**Meuse à St-Mihiel (2540 km<sup>2</sup>)**



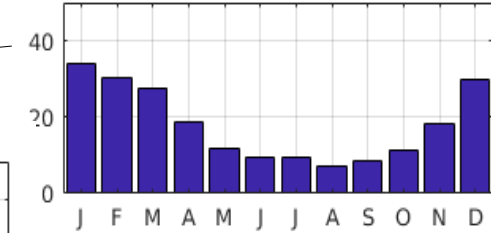
**Meuse à Borgharen (21300 km<sup>2</sup>)**



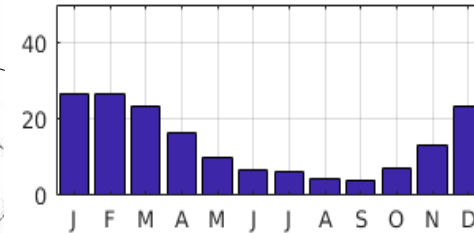
**Vesdre à Chaudfontaine (683 km<sup>2</sup>)**



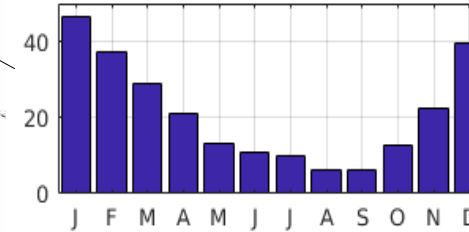
**Ambliève à Martinrive (1068 km<sup>2</sup>)**



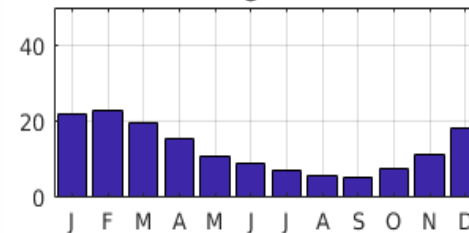
**Ourthe à Tabreux (1607 km<sup>2</sup>)**



**Semois à Haulmé (1336 km<sup>2</sup>)**



**Chiers à Carignan (1967 km<sup>2</sup>)**



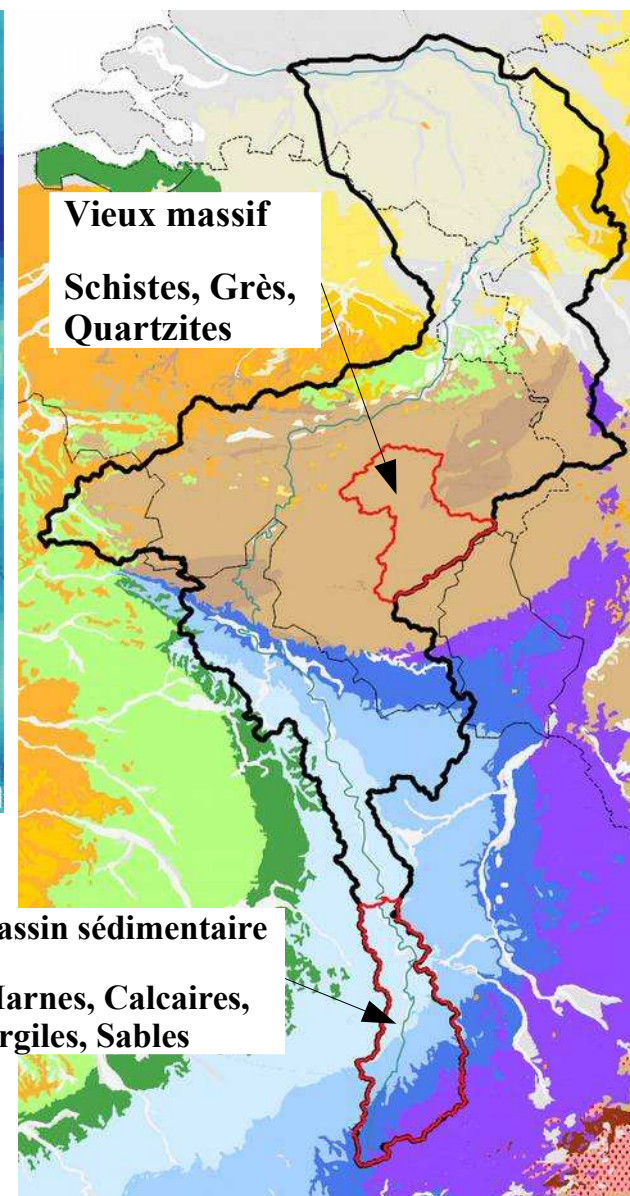
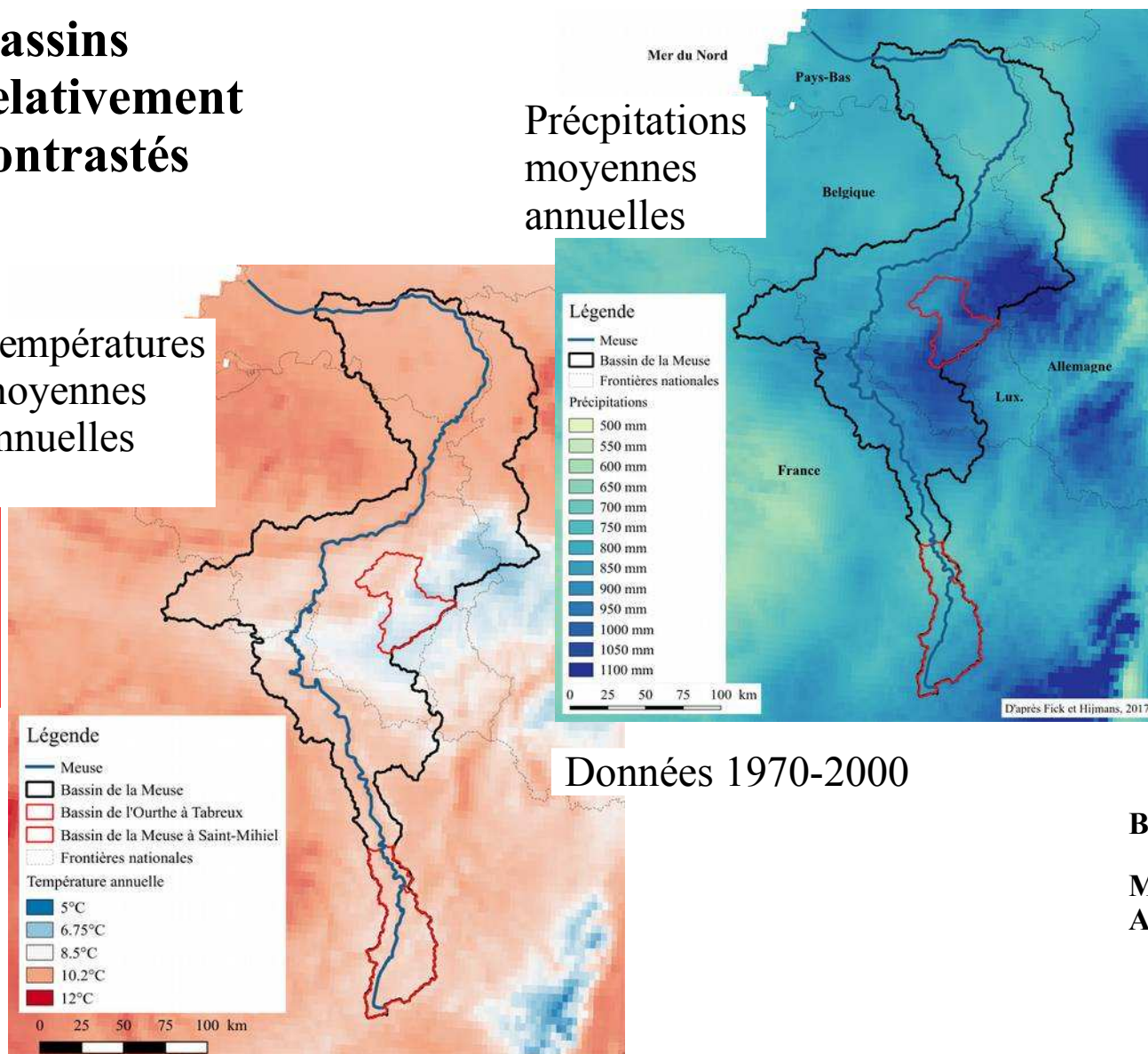
**Débits mensuels spécifiques en l/s/km<sup>2</sup>**

## Sous-bassins de la Meuse à Saint-Mihiel et de l'Ourthe à Tabreux

**Bassins  
relativement  
contrastés**

**Températures  
moyennes  
annuelles**

**Précipitations  
moyennes  
annuelles**



**Quel indicateur pour décrire la  
circulation atmosphérique générale  
?**

# Indicateur de la circulation atmosphérique

## Gradient de pression régional (GRP)

Kastendeuch (2007)

→ **prédicteurs performants de la variabilité méso-échelle des précipitations et températures de l'air mensuelles en Europe de l'Ouest**

▶  $P_{atm}$  au point central (5°E-50°N)

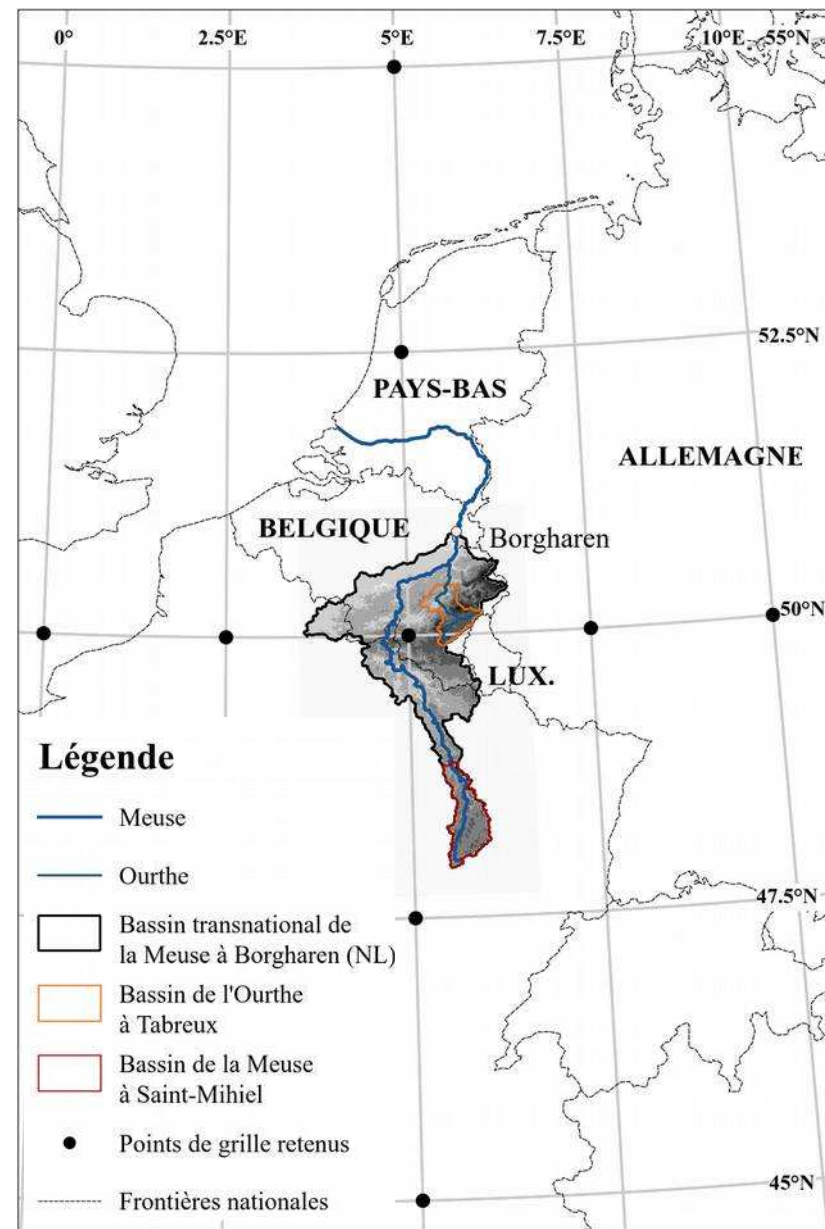
▶  $X_{GRP} = (P_{(E)} - P_{(O)}) / dist_{Est-Ouest}$

▶  $Y_{GRP} = (P_{(N)} - P_{(S)}) / dist_{Nord-Sud}$

$P_{atm}$  → situation atmosphérique dominante au niveau du bassin (anticyclonique, dépressionnaire, marais barométrique)

$X_{GRP}$  → intensité du flux méridien (air tropical/air polaire)

$Y_{GRP}$  → intensité du flux zonal (air continental/air maritime)



## Gradient de pression régional (GRP)

### Calcul en temps passé-présent

→ **reconstruction de Luterbacher et al (2002)**

- Mensuel
- 1659-1999 (complété avec NCEP/NCAR jusqu'à 2005)
- Données en points de grille
  - $P_{atm}$  :  $5^\circ \times 5^\circ$
  - Z500 :  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$

### Calcul en temps futur

→ **sorties des modèles de climat CMIP5-GIEC**

- Mensuel
- 2006-2100
- $P_{atm}$  :  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$
- Z500 :  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$

**Continuum**

**passé**

-

**présent**

-

**futur**





# Indicateur de la circulation atmosphérique

## Sélection des modèles climatiques

- 13 MCGs intégrés au CMIP5
- Sorties pour 2 RCPs
  - **RCP4.5** : stabilisation du réchauffement climatique H2100
  - **RCP8.5** : amplification réchauffement climatique H2100
- 2 variables retenues
  - $P_{atm}$  : pression atmosphérique au niveau de la mer
  - **Z500** : hauteur du géopotential 500 hPa

Institut météorologique	Pays	Nom du modèle
College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University (GCESS)	Chine	BNU-ESM
Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis (CCCma)	Canada	CanESM2
Centre National de Recherches Météorologiques / Centre Européen de Recherche et Formation Avancées en Calcul Scientifique (CNRM-CERFACS)	France	CNRM-CM5
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, in collaboration with the Queensland Climate Change Centre of Excellence (CSIRO-QCCCE)	Australie	CSIRO-Mk3.6.0
Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (NOAA GFDL)	États-Unis	GFDL-ESM2G
Institute for Numerical Mathematics (INM)	Russie	INM-CM4
Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL)	France	IPSL-CM5-MR
Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC)	Japon	MIROC5
Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	Allemagne	MPI-ESM-LR
Meteorological Research Institute (MRI)	Japon	MRI-CGCM3
National Center for Atmospheric Research (NCAR)	États-Unis	CCSM4
Norwegian Climate Centre (NCC)	Norvège	NorESM1-M
Met Office Hadley Centre (MOHC)	Royaume-Uni	HadGEM2-ES

TABLE 3.1 – Liste des modèles climatiques CMIP5 utilisés dans cette étude. Source : <http://www.esrl.noaa.gov/psd/ipcc/cmip5/help.html>.

**Comment augmenter le réalisme du  
GRP calculé à partir des sortie de  
MCG ?**

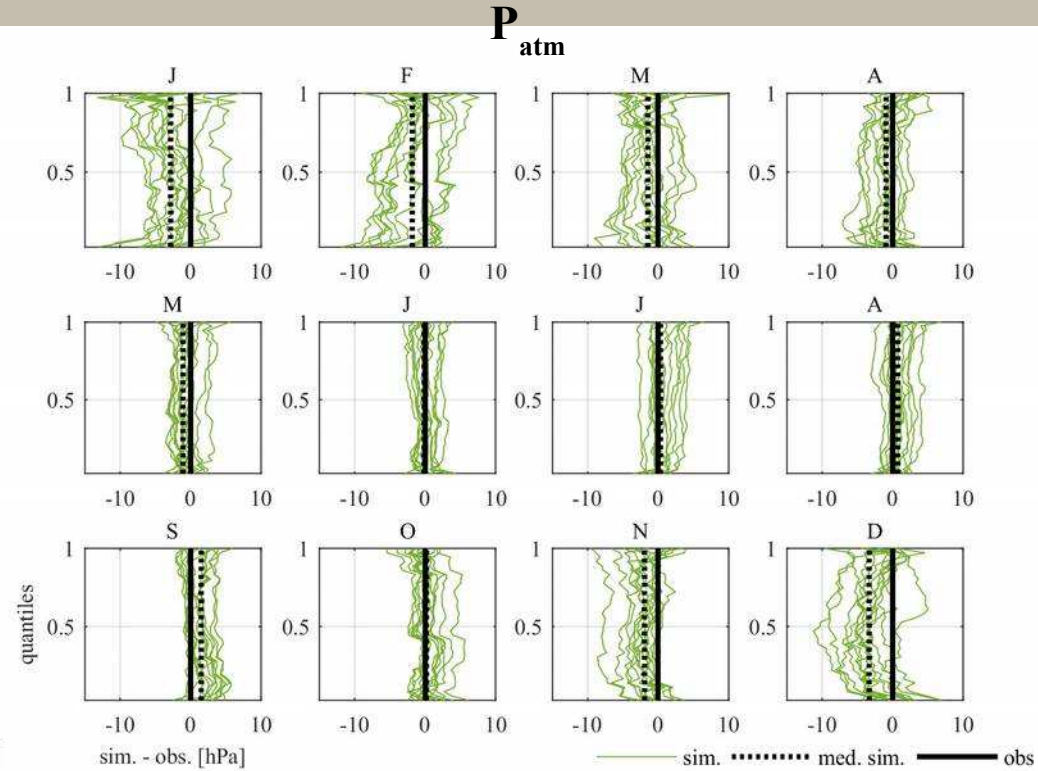
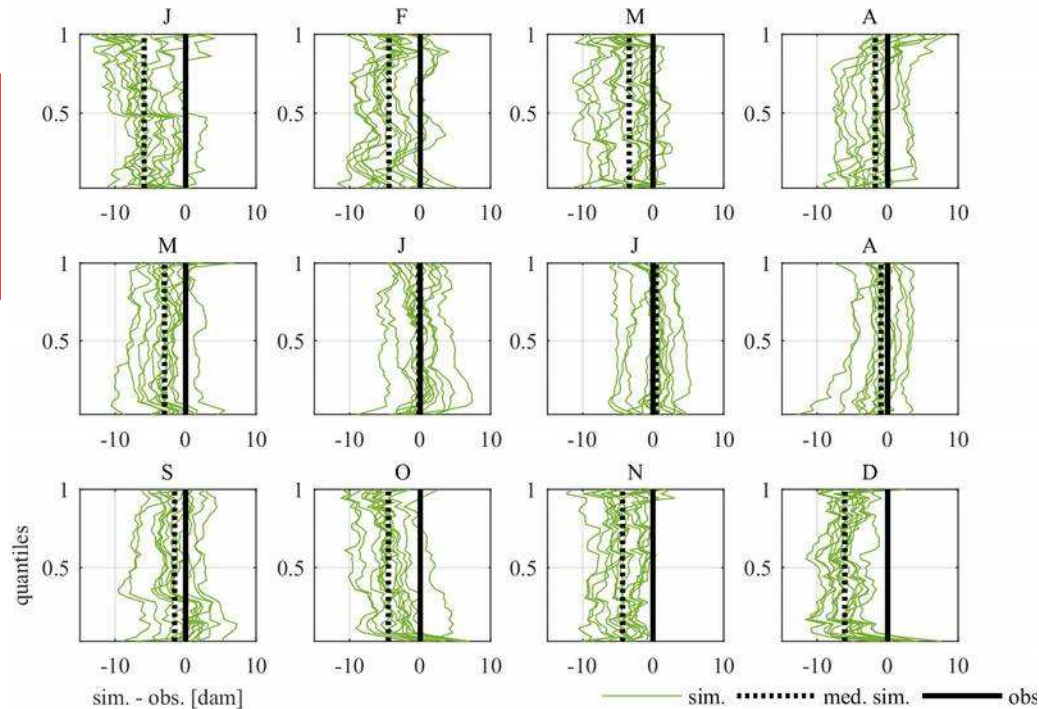
## Biais des sorties MCGs

Sur période de référence, procédure d'identification des biais par comparaison des quantiles des observations vs run 'historique' des MCGs



**Biais existant**

**Z500**



**Nécessité de débiaiser les sorties MCG**



**Quelle méthode de débiaisage ?**

## Débiaisage des sorties MCGs

Méthode inspirée de Li et al (2010)

**Méthode appliquée pour chaque MCG et chaque RCP**

Séries – temps présent

Séries – temps futur

Rééchantillonnage

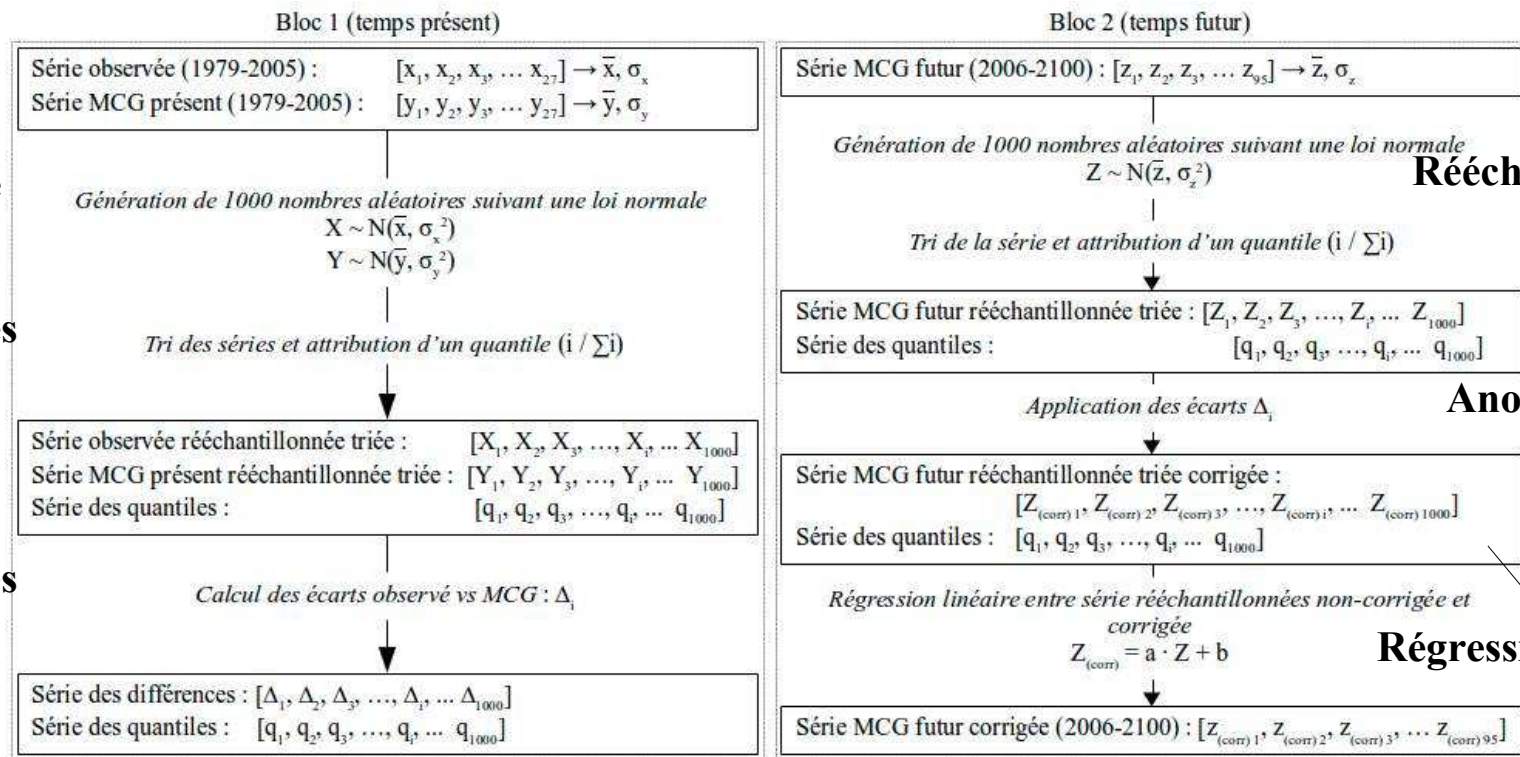
Quantiles

Anomalies

Rééchantillonnage

Anomalisation

Régression linéaire

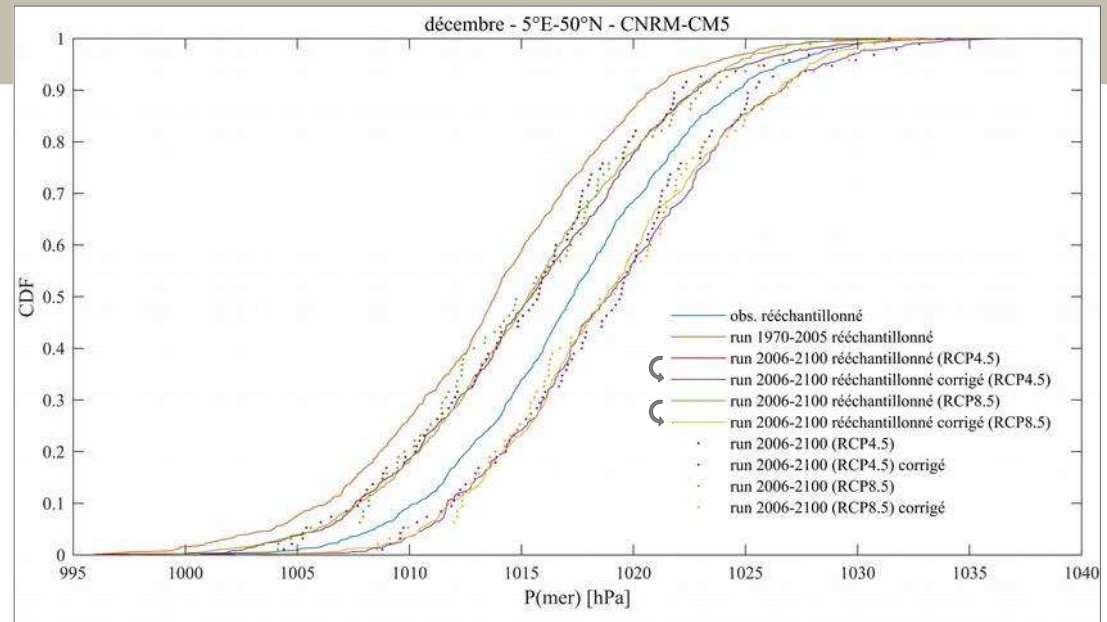


# Sorties MCG

## Débiaisage des sorties MCGs

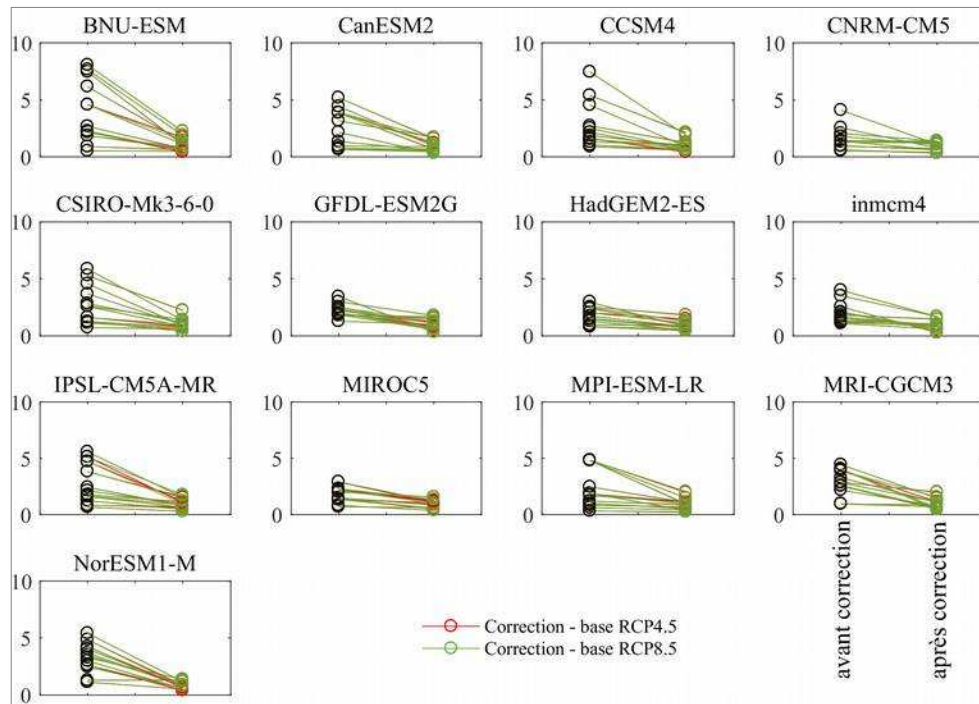
Réduction du biais entre quantiles obs. vs MCG (temps présent) après correction mise en œuvre

→ pour l'ensemble des MCGs



Application aux séries MCG futures

Utilisation pour la suite de la chaîne de modélisation



(RMSE : racine carrée de l'erreur quadratique moyenne)

Valeur du RMSE obs. vs GCM avant/après débiaisage

# Étude de la relation GRP – écoulement



## Méthode de transfert climat – écoulement

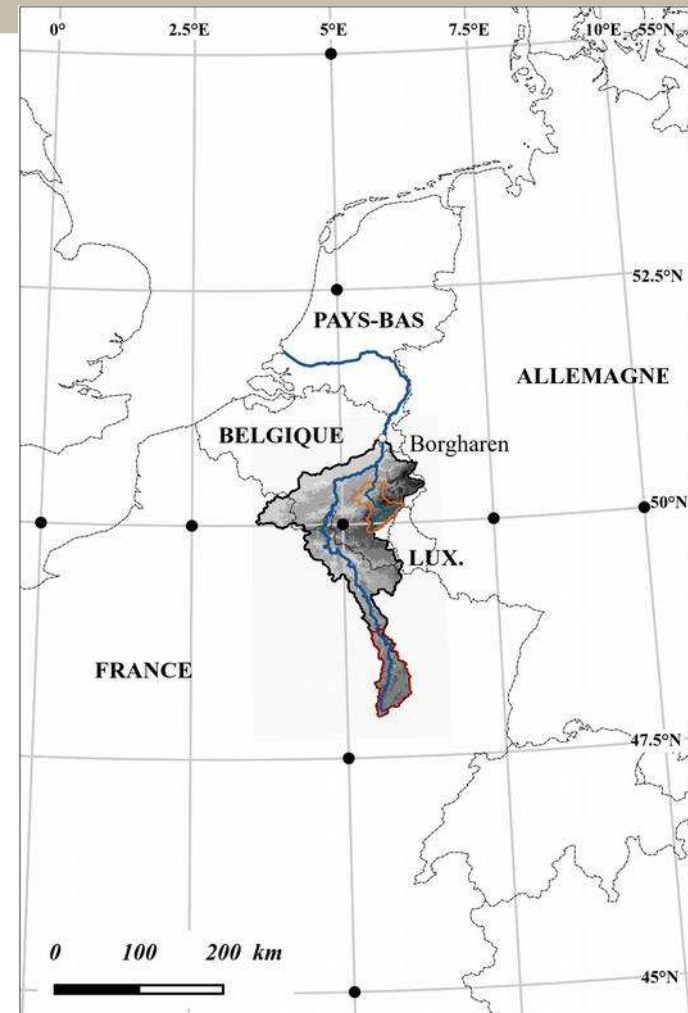
### Quels indices climatiques ?

Limites des indices NAO, types de temps, AMO déjà utilisés en transfert climat – écoulement (Europe de l'Ouest)



test de nouveaux indices

- **Paris-London westerly index (P-LWI)**  
(Slonosky et al, 2000)
- **Gradient Régional de Pression (GRP)**  
(Kastendeuch, 2007)



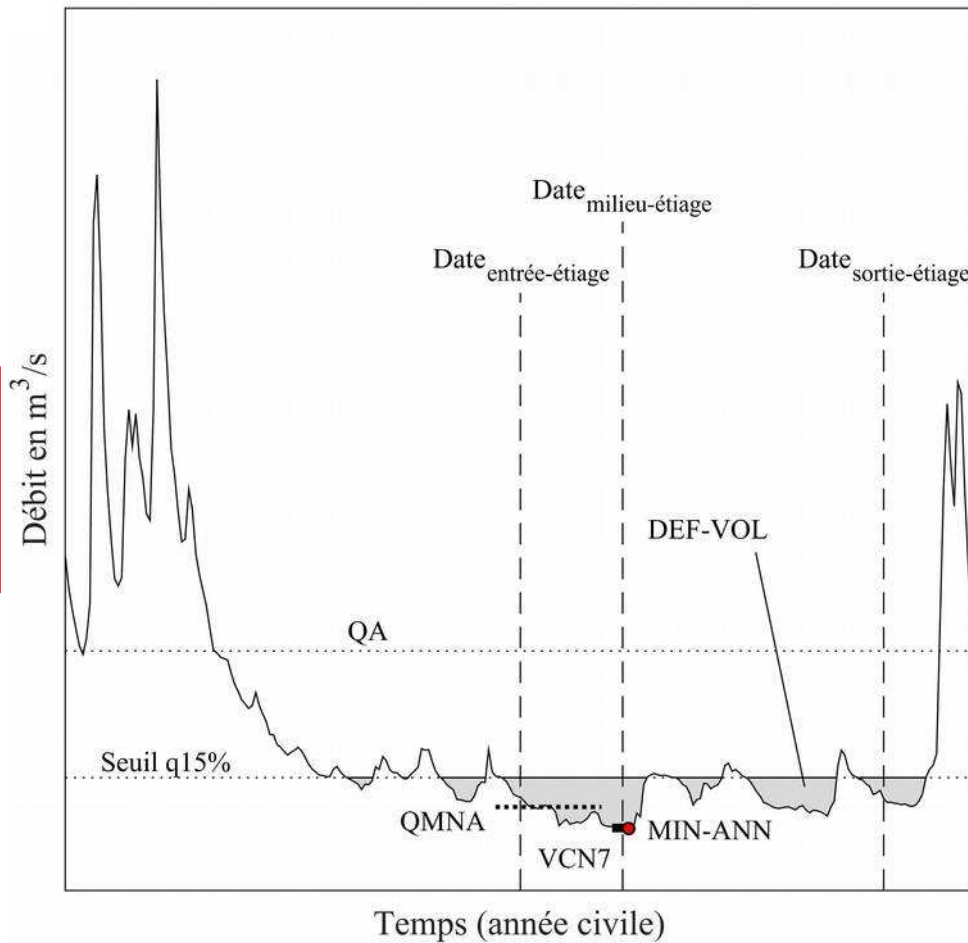
## Méthode de transfert climat – écoulement

### Quels indices hydrologiques ?

### Types d'indices

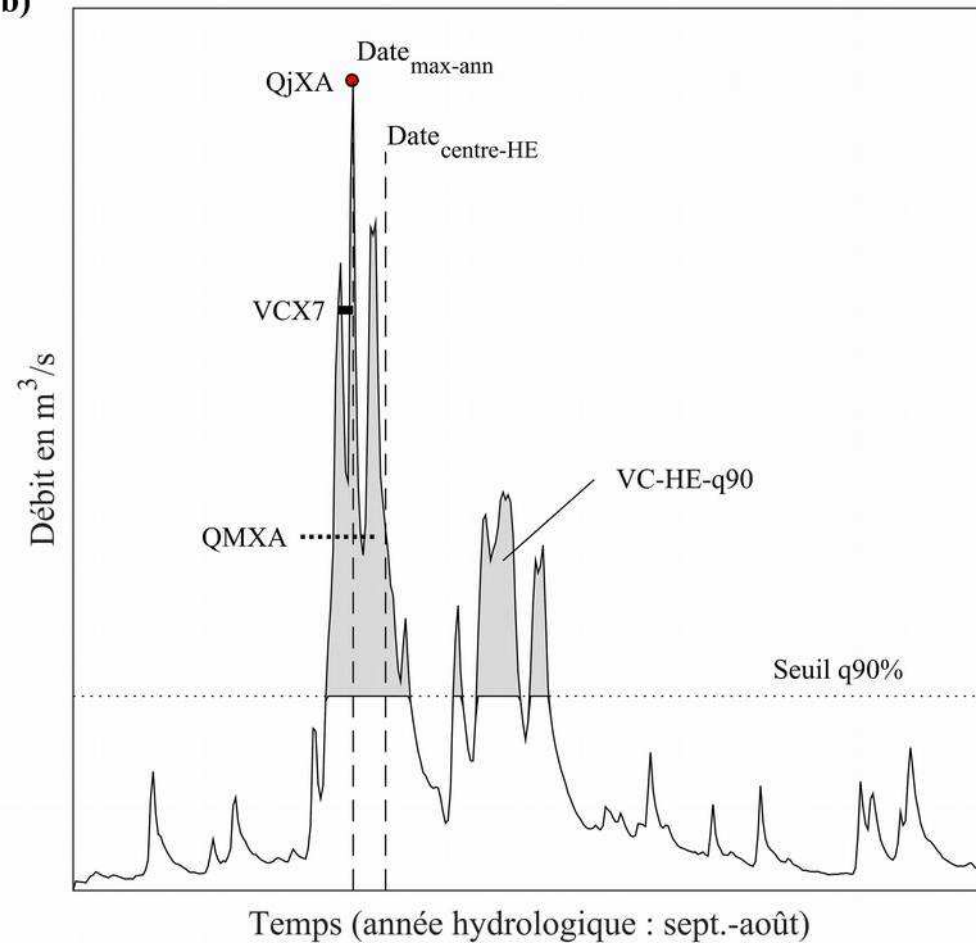
- Indices intégrateurs
- Indices événementiels
- Indices chronologiques

Basses eaux



Hautes eaux

b)





## Méthode de transfert climat – écoulement

### Quelle fonction de transfert ?

## Objectifs des fonctions de transfert

→ parcimonie

→ réalisme

Jeu complet des variables atmosphérique

$P_{\text{centre}}, X_{\text{GRP}}, Y_{\text{GRP}}$

x  $P_{\text{atm}}, Z500$

x Grille  $2.5^\circ, 5^\circ$

x Annuel, semestriel, saisonnier, mensuel

= **210 prédicteurs potentiels**

vs.

14 indices hydrologiques

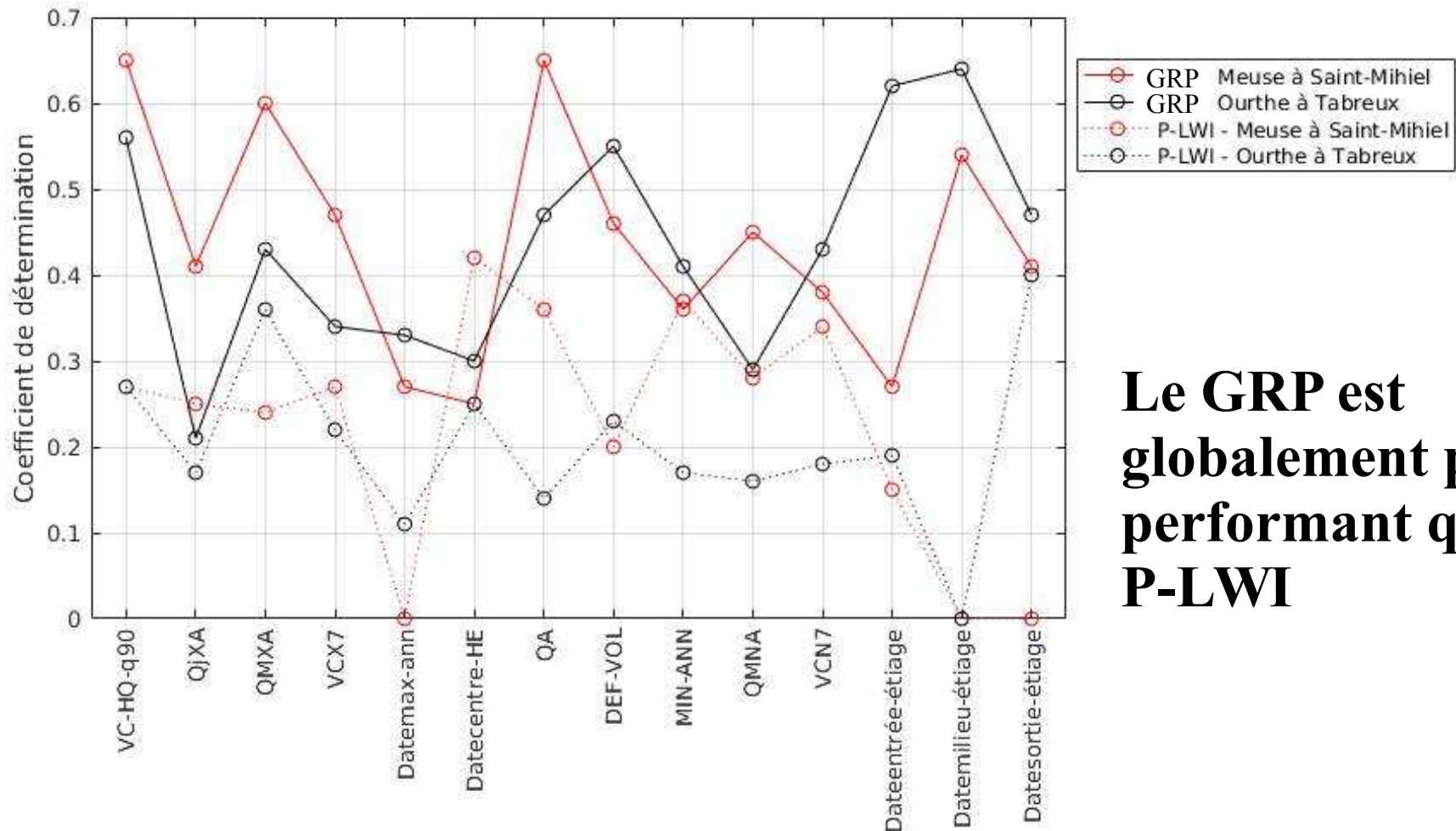
Période : 1970-2011

### 3 étapes :

- **Régression PLS** (Partial Least Square)
  - Recherche des composantes du modèles
  - Sélection  $S$  des variables les plus importantes en projection
- **Régression linéaire multiple** (RLM) "pas à pas" sur la sélection  $S$

## Résultats

### Qualité des régressions



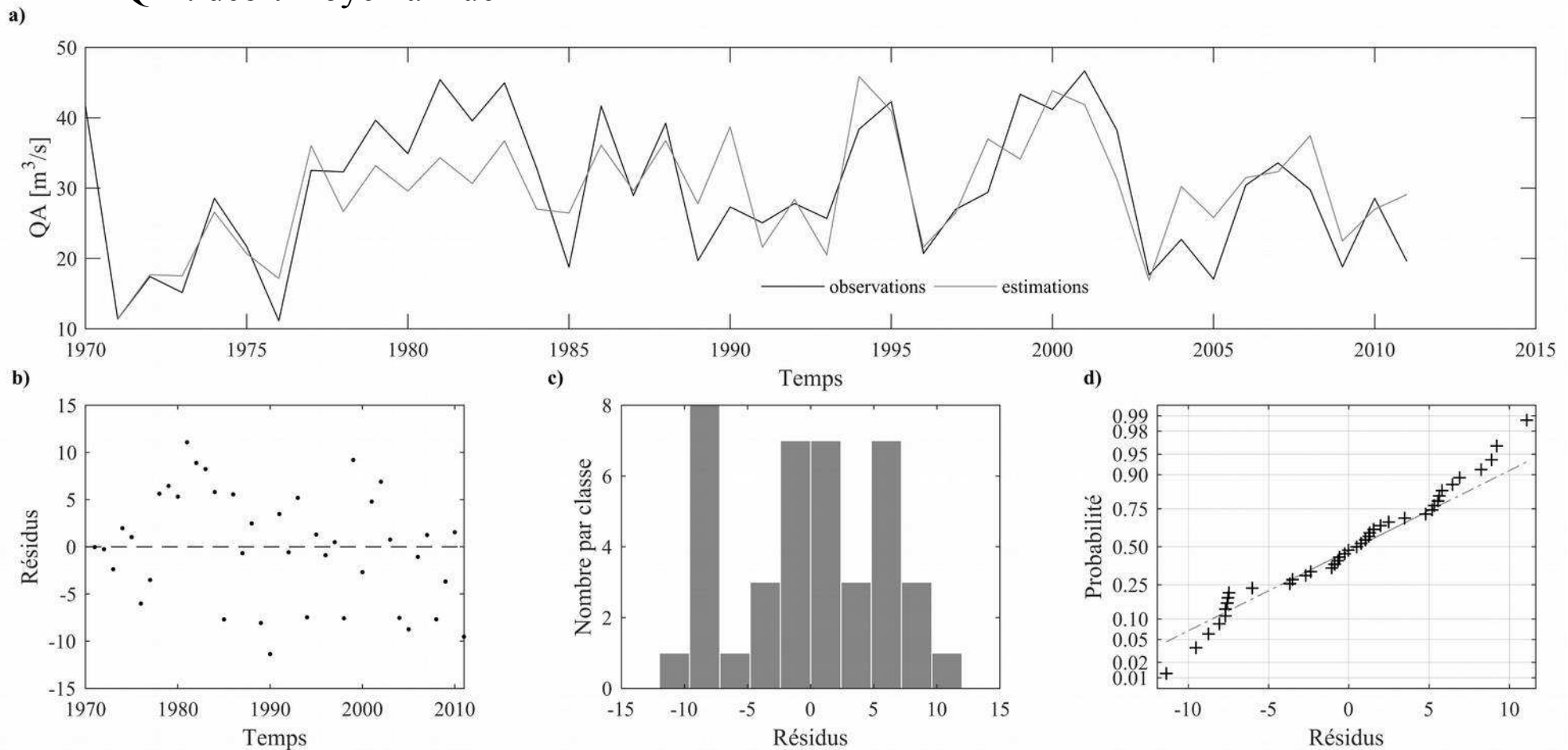
**Le GRP est globalement plus performant que le P-LWI**

## Résultats

### Qualité des estimations

Variabilité relativement bien reproduite

QA : débit moyen annuel

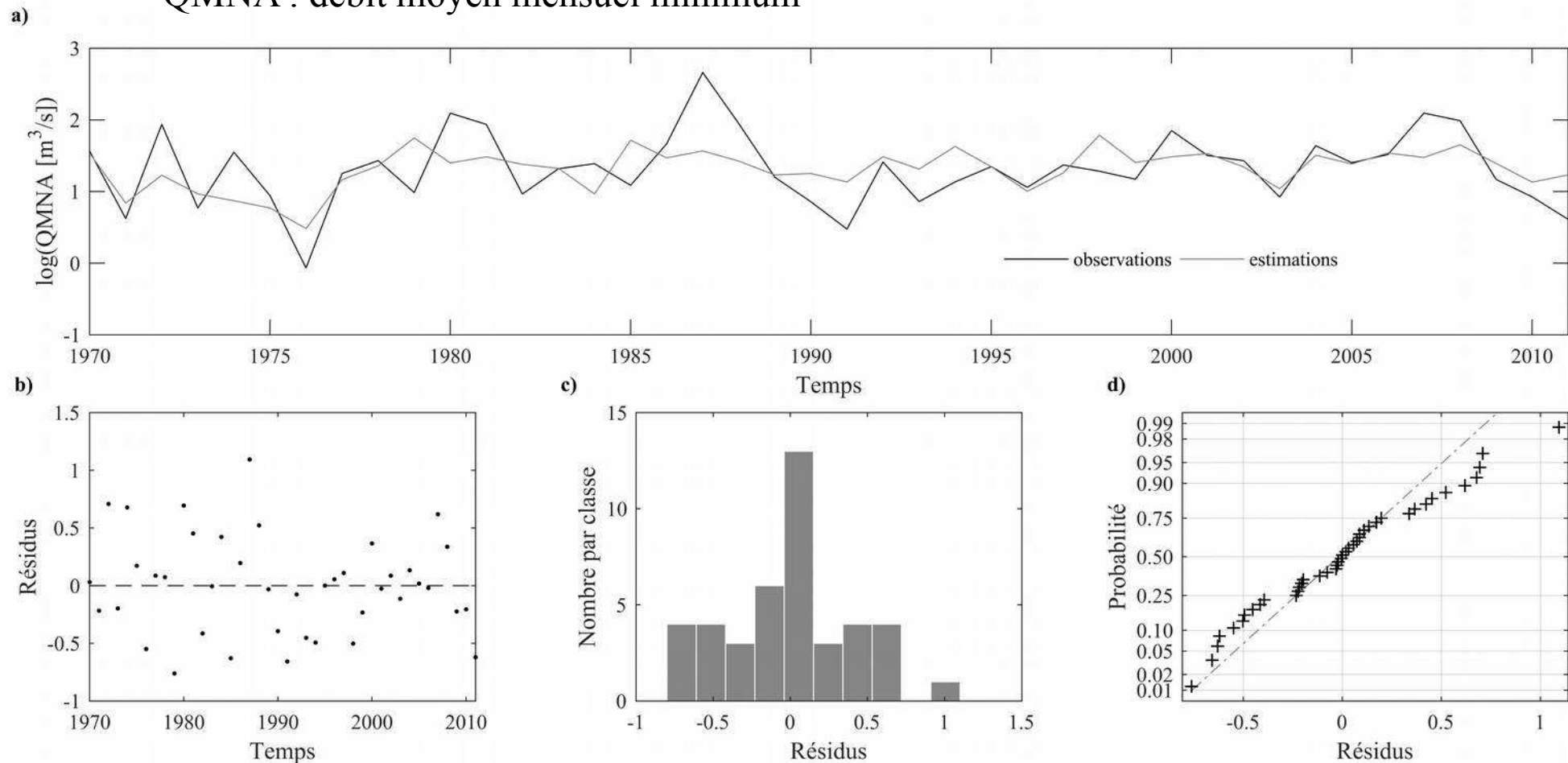


## Résultats

### Qualité des estimations

Variabilité faiblement reproduite

QMNA : débit moyen mensuel minimum



## Résultats

### Extrapolation en temps futur

#### Changements de la moyenne multi-modèles

Bassin	Indice d'écoulement	1981-2010	2021-2050		2071-2100	
			RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
Meuse à Saint-Mihiel	VC-HE-q90	+2				+13
	DEF-VOL	-6	+68	+42	+71	+118
	MIN-ANN	+4	-66	-191	-193	-196
	Date <sub>entrée-étiage</sub>	-4		-12	-17	-37
Ourthe à Tabreux	QjXA	+5				+13
	QMXA	+4				+17
	VCX7	+5				+16
	DEF-VOL	-26	+117	+59	+86	+149
	MIN-ANN	+4			-14	-17
	QMNA	+7		-11	-13	-19
	Date <sub>entrée-étiage</sub>	-1				+12
	Date <sub>centre-étiage</sub>	-2			+11	+18


## Synthèse

### Opportunités et limites

GRP  prédicteur prometteur comparé à d'autres indices : **fort lien entre GRP et variables de forçage climatique**

Mais **capacités prédictives des fonctions de transfert limitées** : seuls quelques indices sont bien prédits, et part non négligeable de la variabilité non expliquée par le GRP

→ **le recours à un modèle pluie-débit garantit la prise en compte de la non linéarité de la transformation pluie-débit (rôle de filtre du bassin)**



# Relation GRP – variabilité hydroclimatique – écoulement

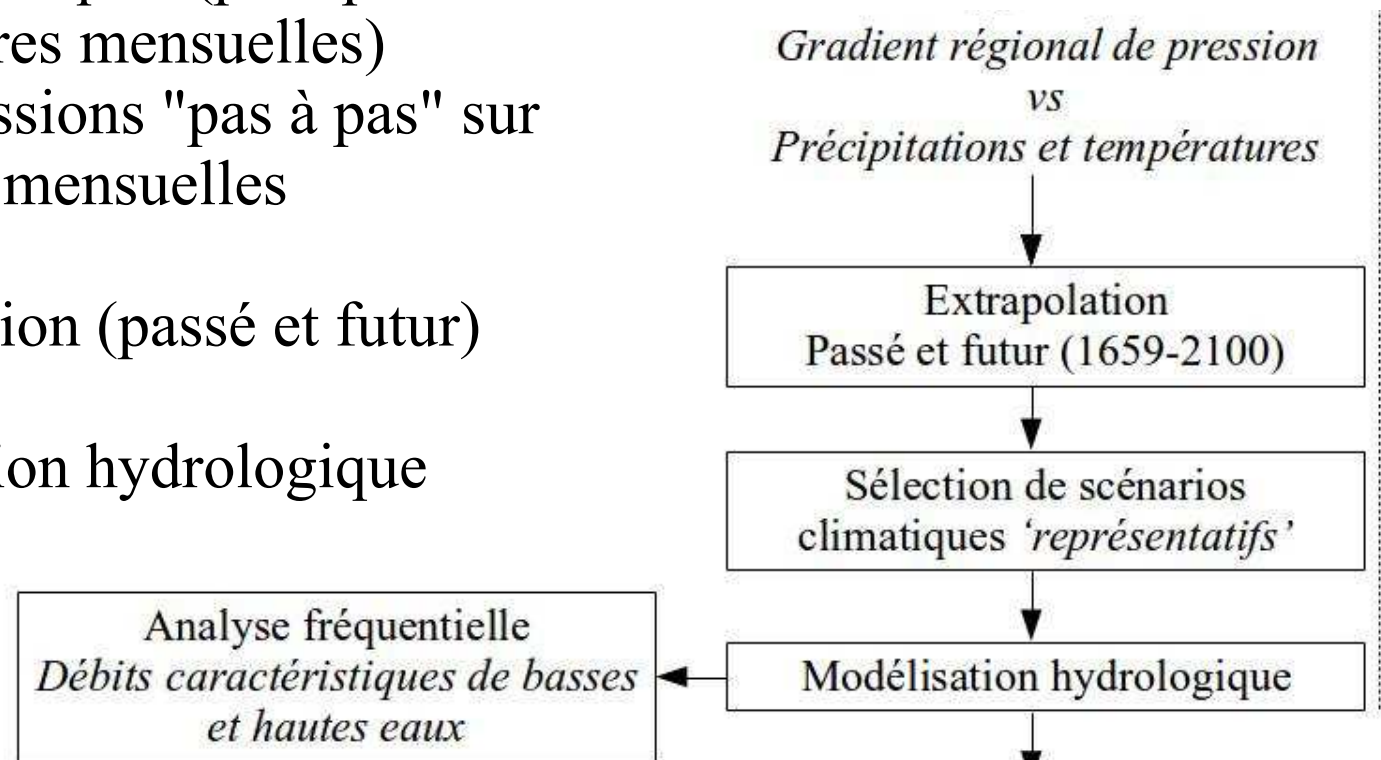
## Approche

### Séquençage du transfert climat – écoulement

- Fonction de transfert circulation atmosphérique (GRP) vs variables hydroclimatiques (précipitations et températures mensuelles)  
→ régressions "pas à pas" sur données mensuelles
- Extrapolation (passé et futur)
- Modélisation hydrologique

Bassins :

- Meuse à Saint-Mihiel
- Ourthe à Tabreux





# Relation GRP – variabilité hydroclimatique – écoulement

## Résultats Qualité des régressions

Comparaison de différentes configuration de GRP (en fonction de la résolution spatiale)  
+ indice Paris-Londres  
+ indices de téléconnexion ‘classiques’

GRP(SLP (5°)  
+ Z500 (2.5°))



meilleur compromis

Meuse à Saint-Mihiel

Configurations	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
GRP(SLP)	0.759	0.793	<b>0.869</b>	<b>0.790</b>	0.646	<b>0.671</b>	0.767	<b>0.720</b>	<b>0.810</b>	0.829	0.747	0.750
GRP(SLP (5°) + Z500 (2.5°))	<b>0.787</b>	0.803	<b>0.869</b>	<b>0.790</b>	<b>0.680</b>	<b>0.671</b>	0.808	<b>0.720</b>	<b>0.810</b>	0.829	0.752	0.772
GRP(SLP (5°) + Z500 (5°))	0.775	<b>0.804</b>	<b>0.869</b>	<b>0.790</b>	0.673	<b>0.671</b>	<b>0.813</b>	<b>0.720</b>	<b>0.810</b>	<b>0.854</b>	<b>0.761</b>	<b>0.776</b>
P-LWI	0.377	0.410	0.430	0.129	0.282	0.036	0.089	0.064	0.341	0.003	0.203	0.231
NAO	0.306	0.080	0.073	0.248	0.062	0.498	0.438	0.351	0.248	0.319	0.289	0.177
AMO	0.124	0.181	0.140	0.076	0.216	0.081	0.158	0.178	0.004	0.113	0.178	0.028
Kastendeuch (2007)	0.84	0.85	0.80	0.84	0.69	0.73	0.73	0.79	0.82	0.84	0.83	0.81
GRP(SLP)	0.721	0.808	0.000	0.545	0.653	0.691	0.784	0.476	0.497	0.802	0.483	0.582
GRP(SLP (5°) + Z500 (2.5°))	<b>0.902</b>	<b>0.940</b>	<b>0.963</b>	<b>0.949</b>	<b>0.958</b>	<b>0.950</b>	<b>0.955</b>	<b>0.939</b>	<b>0.921</b>	<b>0.963</b>	<b>0.912</b>	<b>0.689</b>
GRP(SLP (5°) + Z500 (5°))	<b>0.902</b>	<b>0.940</b>	0.963	<b>0.949</b>	<b>0.958</b>	<b>0.950</b>	<b>0.955</b>	<b>0.939</b>	<b>0.921</b>	<b>0.963</b>	<b>0.912</b>	<b>0.812</b>
P-LWI	0.782	0.769	0.340	0.137	0.228	0.036	0.408	0.341	0.313	0.689	0.552	0.633
NAO	0.661	0.326	0.189	0.156	0.161	0.166	0.370	0.168	0.112	0.095	0.057	0.354
AMO	0.083	0.156	0.075	0.308	0.154	0.217	0.231	0.168	0.128	0.342	0.076	0.192
Kastendeuch (2007)	0.85	0.83	0.72	0.72	0.69	0.71	0.75	0.69	0.58	0.74	0.71	0.81

Ourthe à Tabreux

Configuration	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
GRP(SLP)	0.751	<b>0.836</b>	0.791	<b>0.797</b>	<b>0.690</b>	0.732	0.664	0.687	0.785	<b>0.810</b>	<b>0.753</b>	0.821
GRP(SLP (5°) + Z500 (2.5°))	<b>0.789</b>	0.829	<b>0.842</b>	0.752	<b>0.690</b>	0.732	<b>0.718</b>	<b>0.706</b>	<b>0.785</b>	0.790	0.736	<b>0.825</b>
GRP(SLP (5°) + Z500 (5°))	0.785	0.829	0.825	0.752	<b>0.690</b>	<b>0.757</b>	<b>0.718</b>	0.701	0.785	0.773	0.736	0.820
P-LWI	0.446	0.500	0.408	0.312	0.329	0.133	0.070	0.094	0.232	0.001	0.140	0.415
NAO	0.410	0.286	0.009	0.111	0.056	0.396	0.351	0.428	0.287	0.271	0.294	0.461
AMO	0.010	0.292	0.052	0.051	0.136	0.084	0.116	0.196	0.025	0.004	0.136	0.095
Kastendeuch (2007)	0.84	0.85	0.80	0.84	0.69	0.73	0.73	0.79	0.82	0.84	0.83	0.81
GRP(SLP)	0.733	0.812	0.448	0.549	0.577	0.555	0.767	0.507	0.562	0.689	0.438	0.623
GRP(SLP (5°) + Z500 (2.5°))	<b>0.927</b>	0.946	<b>0.946</b>	<b>0.911</b>	<b>0.920</b>	<b>0.916</b>	<b>0.955</b>	<b>0.926</b>	<b>0.913</b>	<b>0.944</b>	<b>0.915</b>	<b>0.907</b>
GRP(SLP (5°) + Z500 (5°))	<b>0.927</b>	<b>0.946</b>	0.944	<b>0.911</b>	<b>0.920</b>	<b>0.916</b>	0.947	0.918	0.890	0.944	<b>0.915</b>	<b>0.907</b>
P-LWI	0.825	0.825	0.355	0.042	0.196	0.011	0.407	0.416	0.258	0.612	0.608	0.733
NAO	0.690	0.352	0.471	0.128	0.112	0.154	0.341	0.166	0.157	0.046	0.060	0.591
AMO	0.014	0.133	0.053	0.366	0.144	0.177	0.232	0.212	0.205	0.316	0.081	0.154
Kastendeuch (2007)	0.85	0.83	0.72	0.72	0.69	0.71	0.75	0.69	0.58	0.74	0.71	0.81

# Relation GRP – variabilité hydroclimatique – écoulement

## Résultats

### Qualité des estimations

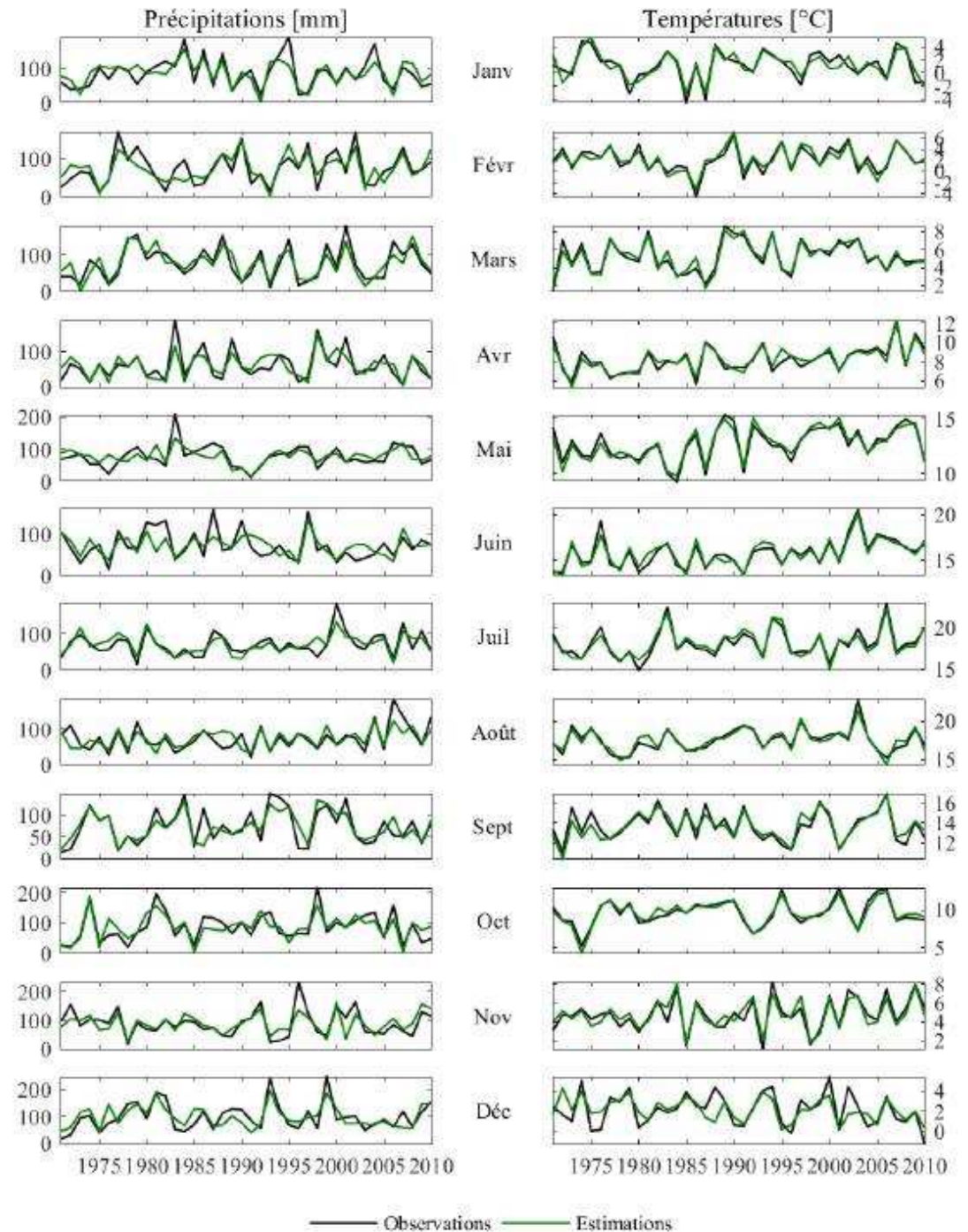
## Températures

Très bien reproduites

## Précipitations

Variabilité relativement bien reproduite, excepté pour certains mois (ex. juin)

→ fonction de correction basée sur les résidus



## Résultats

### Confrontation à des séries historiques

- stationnelles et
- reconstituées en point de grille)

Bassin	Variante	Données	Période	
Meuse à Saint-Mihiel	Précip.	Vesoul (LOTERR)	1845-1900 (39 années)	
		Nancy (LOTERR)	1802-1900 (77 années)	
		Bar-le-Duc (LOTERR)	1847-1870 (24 années)	
		Châlon-en-Champagne (GHCN v3, Lawrimore <i>et al.</i> 2011)	1852-1857 (46 années)	
		Paris (Slonosky, 2002)	1688-1900 (193 années)	
		Metz (GHCN v3, Lawrimore <i>et al.</i> 2011)	1781-1885 (66 années)	
		Verdun (LOTERR)	1857-1875 (18 années)	
	Climatologie en point de grille (saisonnier) (Pauling <i>et al.</i> , 2006)	1659-1900 (242 années)		
	Temp.	Châlon-en-Champagne (GHCN v2, Lawrimore <i>et al.</i> 2011)	1852-1857 (46 années)	
		Paris (Rousseau, 2009, 2013)	1688-1900 (193 années)	
		Metz (GHCN v2, Lawrimore <i>et al.</i> 2011)	1781-1885 (66 années)	
		Climatologie en point de grille (saisonnier) (Luterbacher <i>et al.</i> , 2004; Xoplaki <i>et al.</i> , 2005)	1659-1900 (242 années)	
		Précip.	Sedan (LOTERR)	1873-1900 (28 années)
			Luxembourg (Drogué <i>et al.</i> , 2005)	1854-1900 (47 années)
Trèves (GHCN v2, Lawrimore <i>et al.</i> 2011)			1806-1900 (77 années)	
Coblence (GHCN v2, Lawrimore <i>et al.</i> 2011)	1818-1868 (32 années)			
Aix-la-Chapelle (GHCN v2, Lawrimore <i>et al.</i> 2011)	1843-1890 (39 années)			
Uccle (GHCN v2, Lawrimore <i>et al.</i> 2011)	1833-1900 (68 années)			
Climatologie en point de grille (saisonnier) (Pauling <i>et al.</i> , 2006)	1659-1900 (242 années)			
Temp.	Luxembourg (Drogué, 2003)	1838-1900 (63 années)		
	Trèves (GHCN v3, Lawrimore <i>et al.</i> 2011)	1788-1897 (74 années)		
	Aix-la-Chapelle (GHCN v3, Lawrimore <i>et al.</i> 2011)	1830-1893 (64 années)		
	Uccle (GHCN v3, Lawrimore <i>et al.</i> 2011)	1833-1900 (68 années)		
	De Bilt (van Engelen et Nellestijn 1995) <sup>7</sup>	1706-1900 (195 années)		
	Climatologie en point de grille (saisonnier) (Luterbacher <i>et al.</i> , 2004; Xoplaki <i>et al.</i> , 2005)	1659-1900 (242 années)		

### Légende

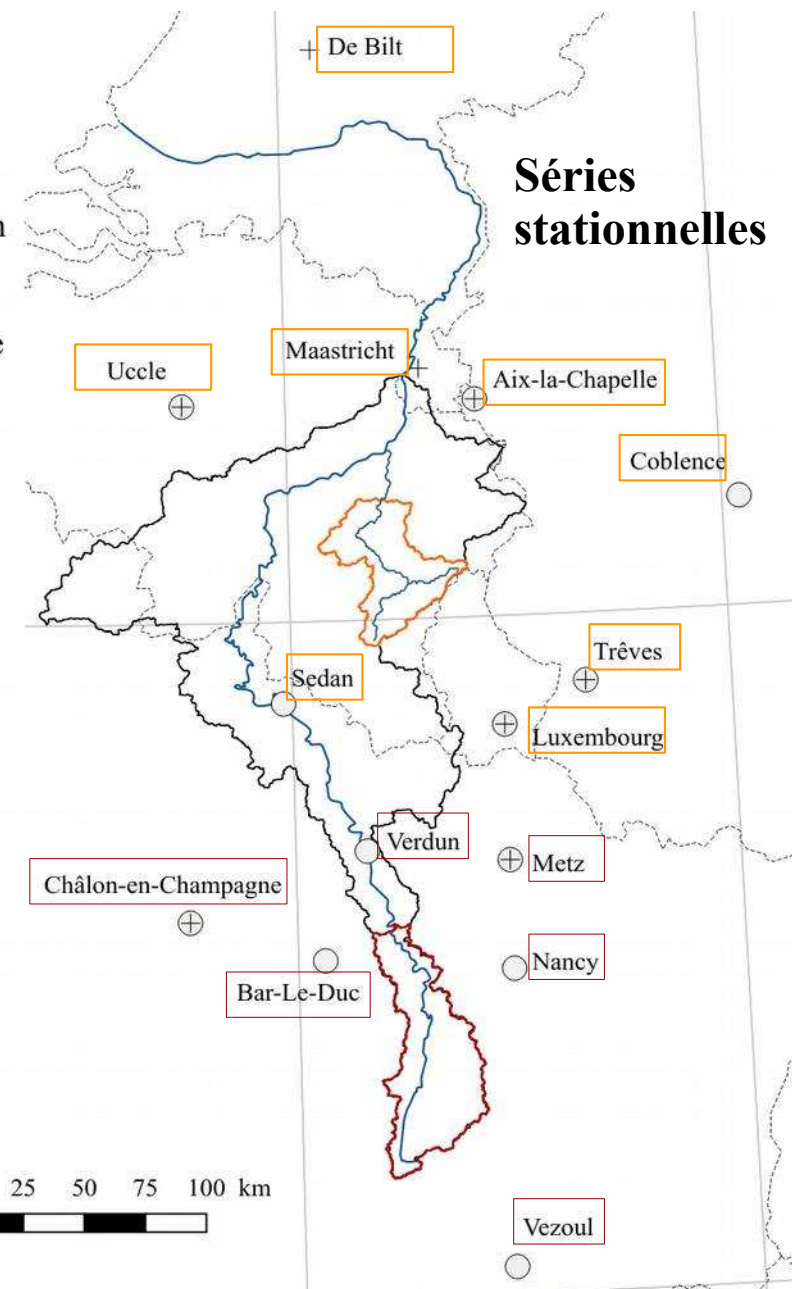
- Frontières internationales
- Bassin de la Meuse à Borgharen
- Bassin de l'Ourthe à Tabreux
- Bassin de la Meuse à Saint-Mihiel
- Meuse
- Ourthe

### Séries historiques

- Précipitations
- + Températures



25 0 25 50 75 100 km



### Séries stationnelles

## Résultats

### Confrontation à des séries historiques

- stationnelles et
- reconstituées en point de grille

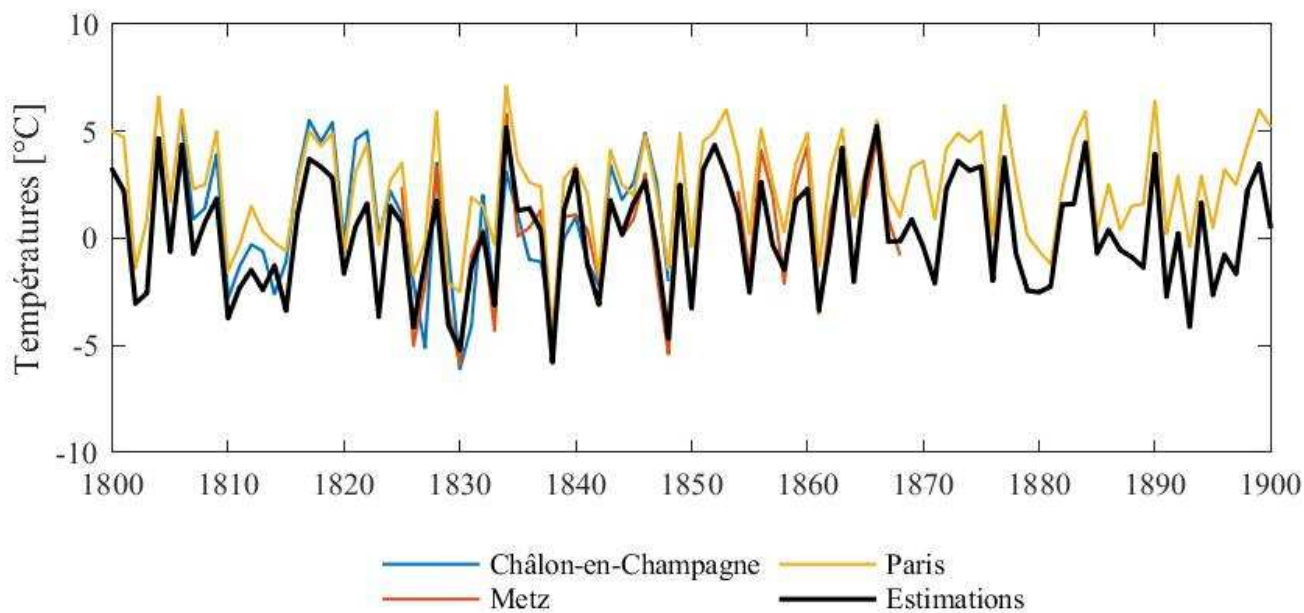
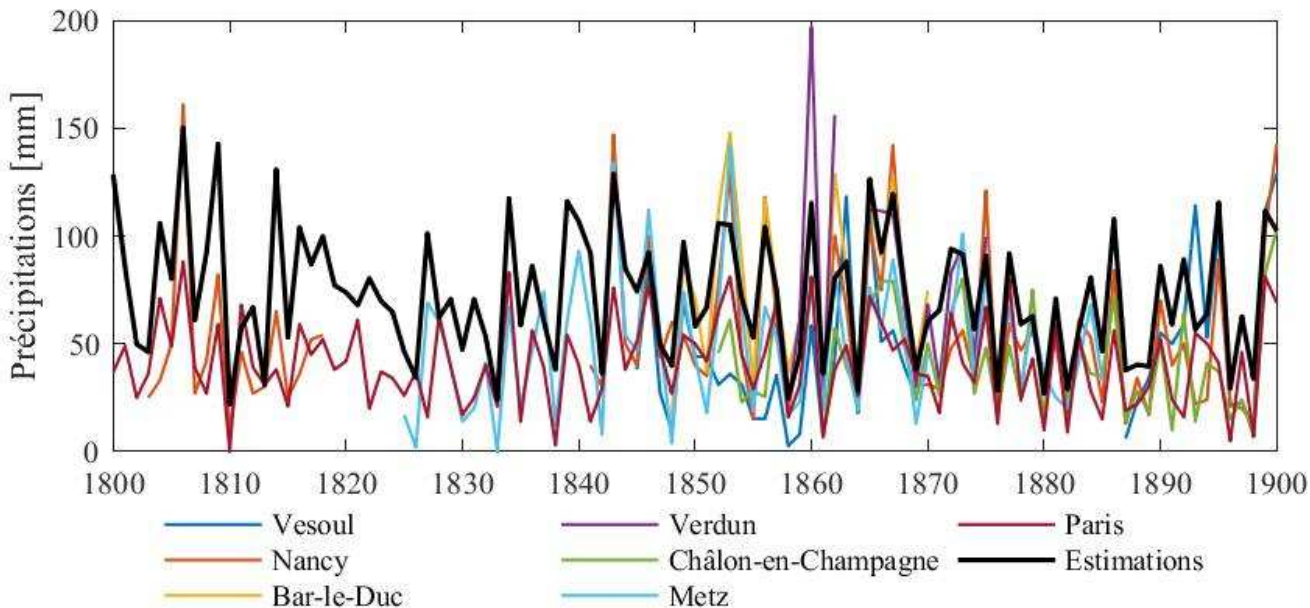
### Précipitations :

Estimations dans la gamme des valeurs des séries historiques

### Températures :

Adéquation très forte

## Comparaison mensuelle - janvier

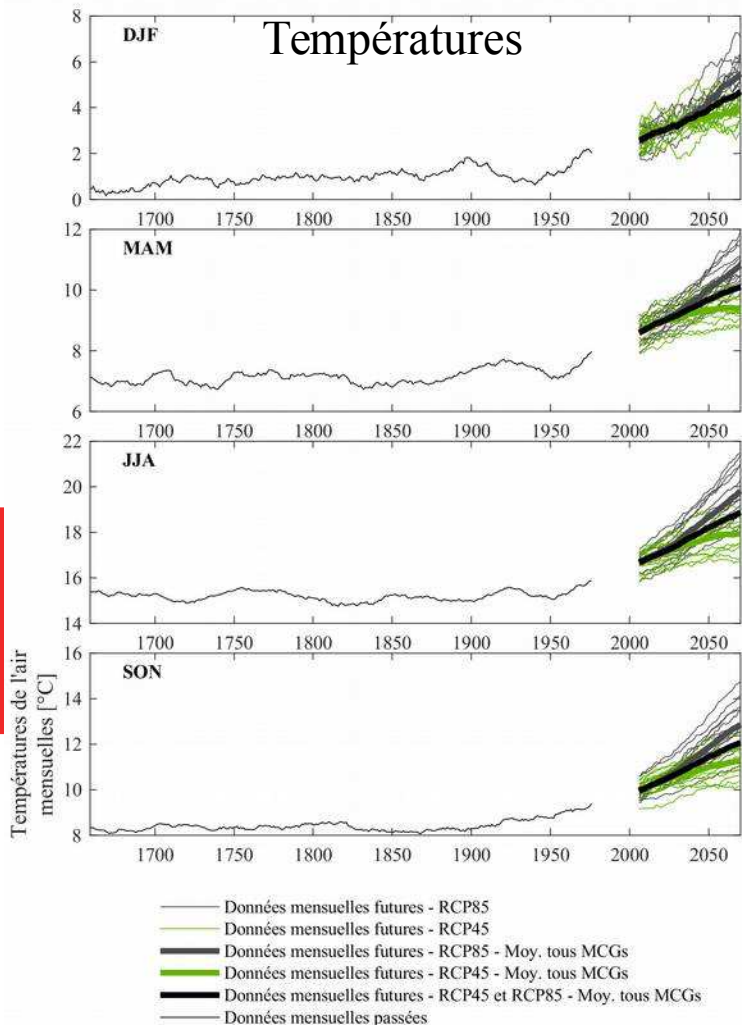


## Résultats

### Extrapolation en temps passé et futur

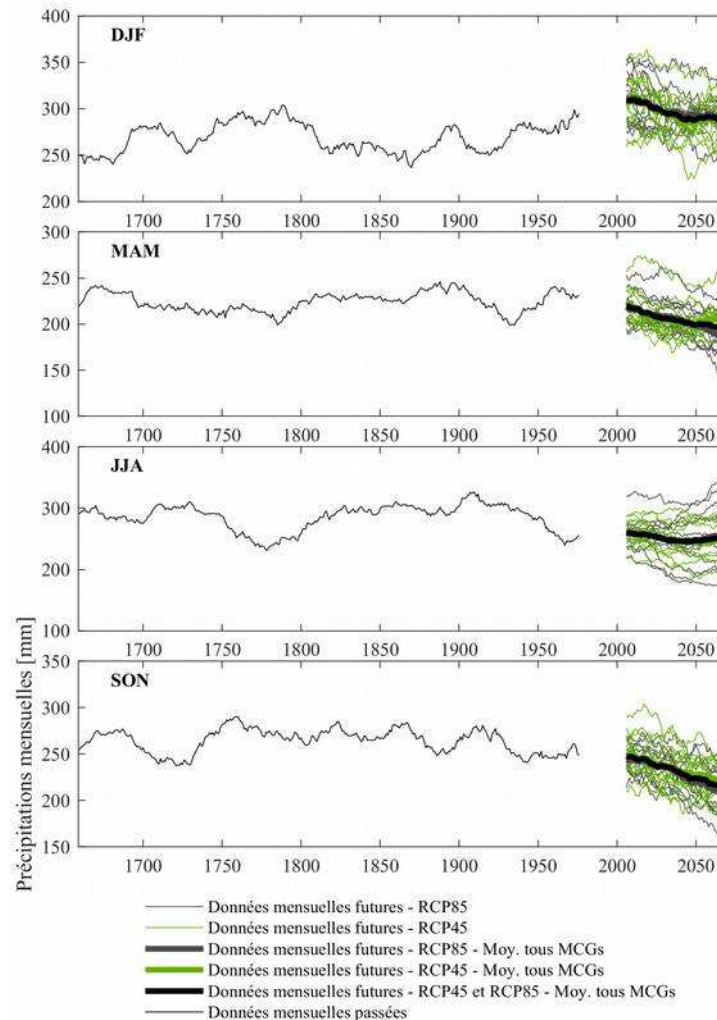
Moyennes mobiles de 30 ans

Plus de 2000 scénarios au total (passé + 13 MCGs x 2 RCP)



Hausse marquée des températures

## Précipitations



Dispersion très forte avec des tendances contradictoires pour les précipitations

## Résultats

### Anomalisation des séries de référence

- Anomalies (+ de 2000 scénarios) mensuelles
- +
- Séries de référence (observations) journalières

### Méthode du delta

Séries ‘anomalisées’ (+ de 2000 scénarios)

→ ex : anomalie de janvier appliquée à toutes les valeurs journalières de janvier de la série de référence

**Limite** : ne modifie pas la fréquence des précipitations (i.e. jours non pluvieux restent non pluvieux) dans les séries de référence

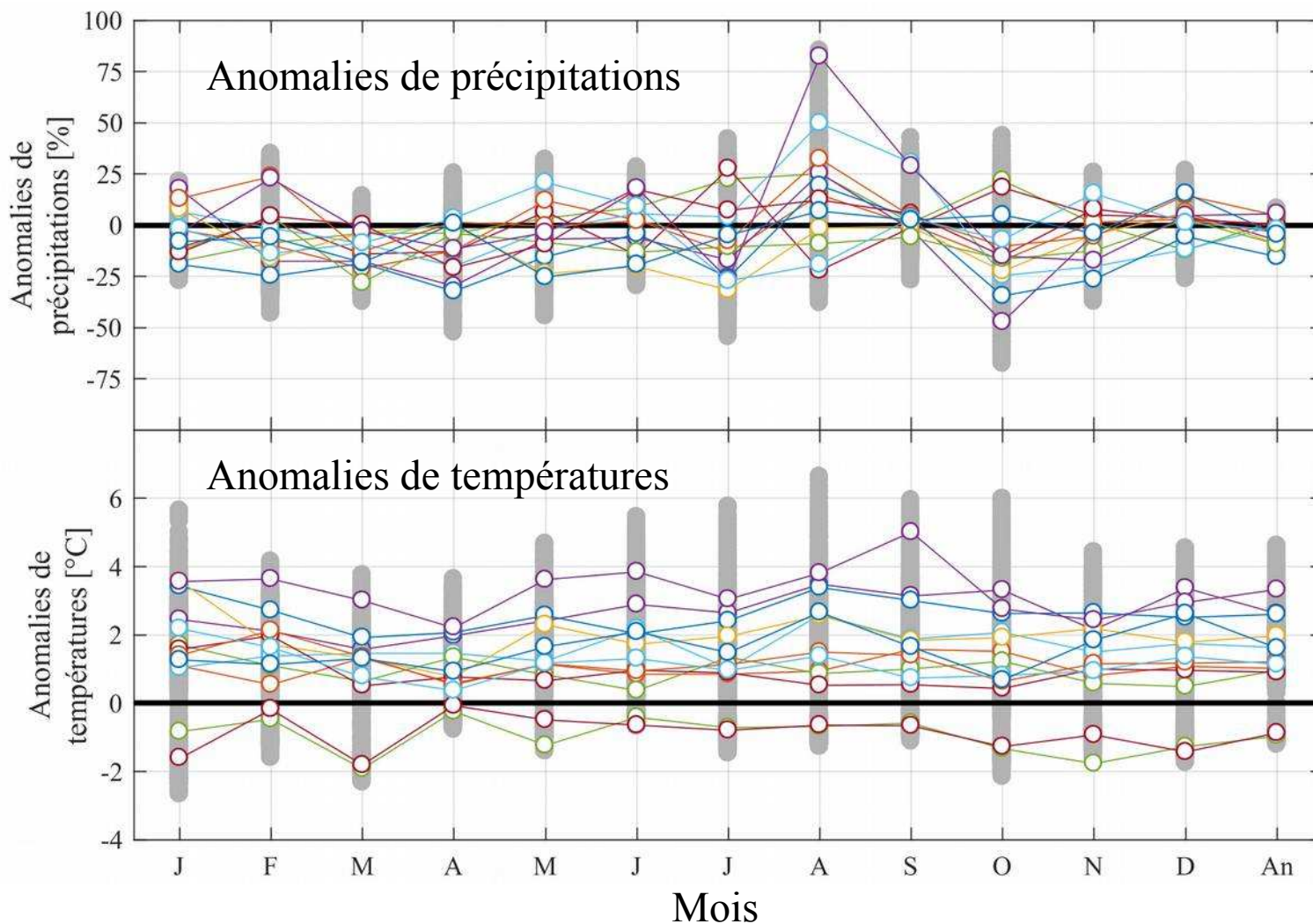
## Résultats

**Sélection de scénarios climatiques ‘représentatifs’  
sur  $n$  possibles (>2000)**

**Justification :**  
modélisation  
hydraulique (cf.  
partie suivante)

Classification  
ascendante  
hiérarchique  
(CAH)

Scénarios climatiques  
représentatifs  
relativement bien  
répartis sur la gamme  
des anomalies de tous  
les scénarios



## Modélisation hydrologique

### Approche

- transférer les scénarios de précipitations et températures en scénarios hydrologiques
- modèle pluie-débit

### Question :

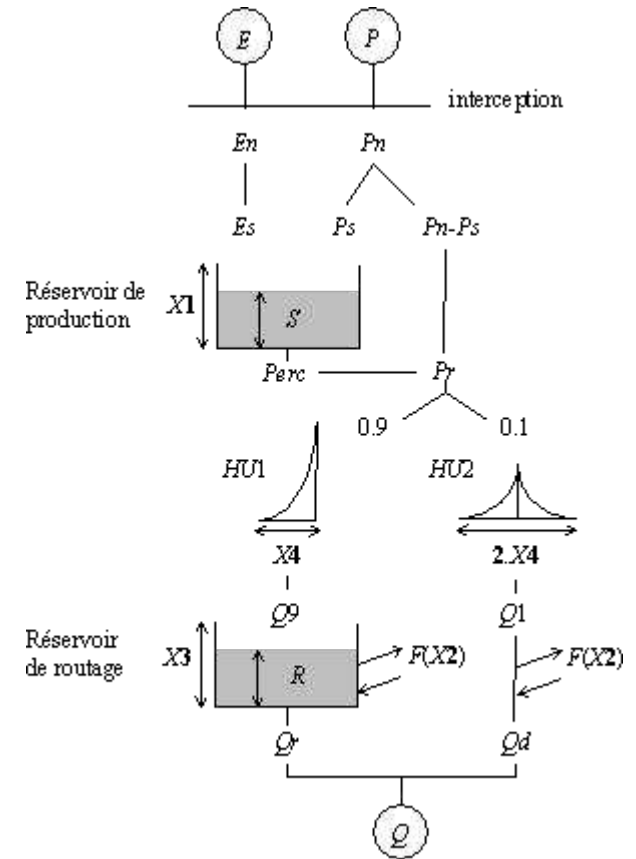
**Est-ce que le modèle pluie-débit aura le même comportement (ie. paramètres identiques) en climat futur (=modifié) ?**

→ calage du modèle climatiquement robuste

→ jeux de paramètres climatiquement différenciés

## Modèle GR4J

(Irstea, Perrin et al, 2007)





## Modélisation hydrologique

(Brigode et al, 2013)

### Procédure de calage du modèle pluie-débit

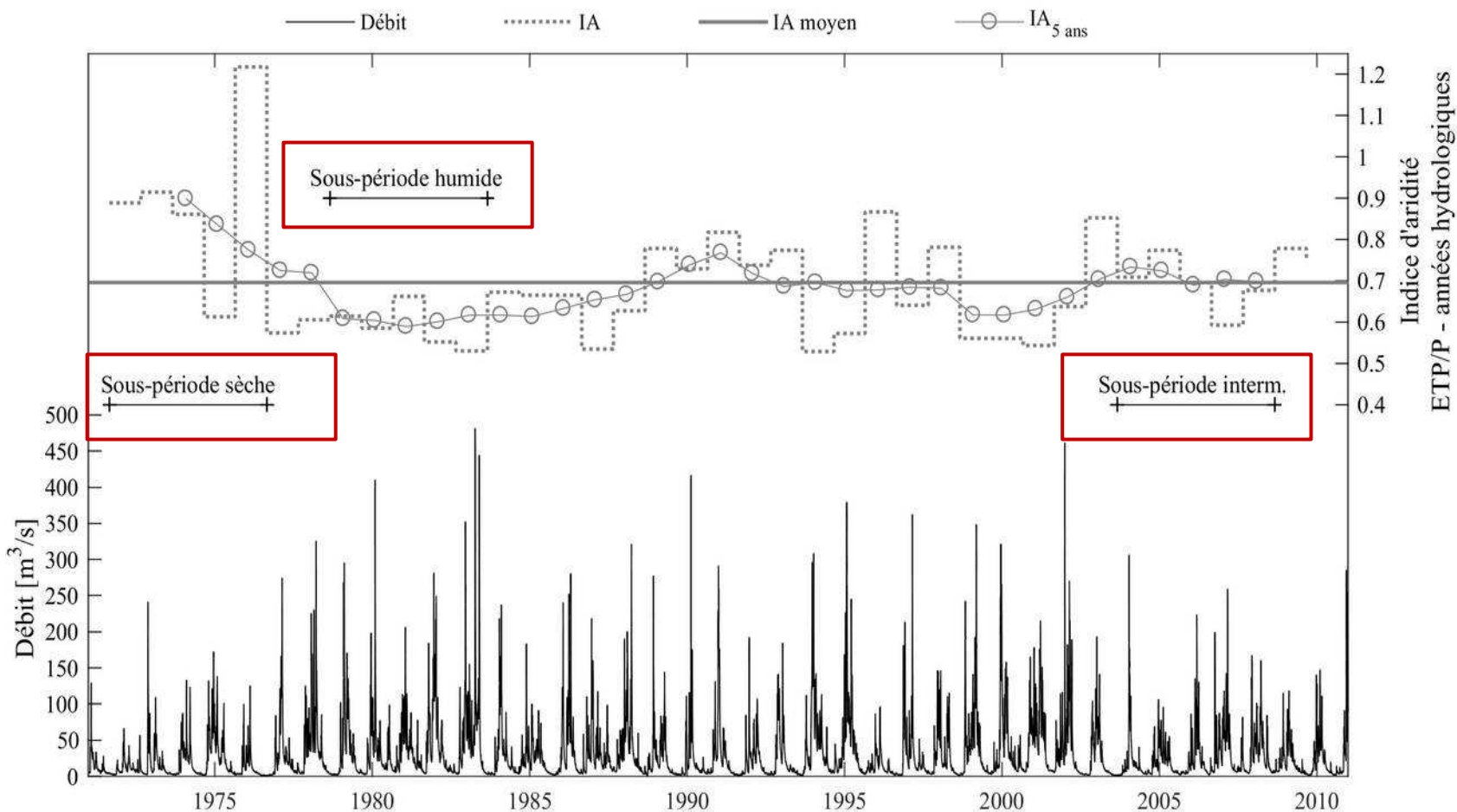
Basé sur l'indice d'aridité (IA) = évapotranspiration / précipitations annuelles

IA faible → année humide

IA fort → année sèche



**3 sous-périodes climatiques**



## Modélisation hydrologique

### Résultats des calages

Fonction objectif du calage : **critère de performance KGE** (Kling-Gupta efficiency)

Station	Classe clim.	Fonction obj	KGE(Q)	KGE(log(Q))
Tabreux	Sèche	KGE	<b>0,94</b>	0,95
		log(KGE)	0,91	<b>0,96</b>
	Humide	KGE	<b>0,95</b>	0,95
		log(KGE)	0,92	<b>0,97</b>
	Interm.	KGE	<b>0,94</b>	0,88
		log(KGE)	0,93	<b>0,95</b>
Saint-Mihiel	Sèche	KGE	<b>0,94</b>	0,96
		log(KGE)	0,91	<b>0,97</b>
	Humide	KGE	<b>0,94</b>	0,97
		log(KGE)	0,92	<b>0,98</b>
	Interm.	KGE	<b>0,94</b>	0,93
		log(KGE)	0,86	<b>0,97</b>

Pour chaque classe climatiques

2 calages du modèle :

- **objectif basses eaux** : log(KGE)

- **objectif hautes eaux** : KGE

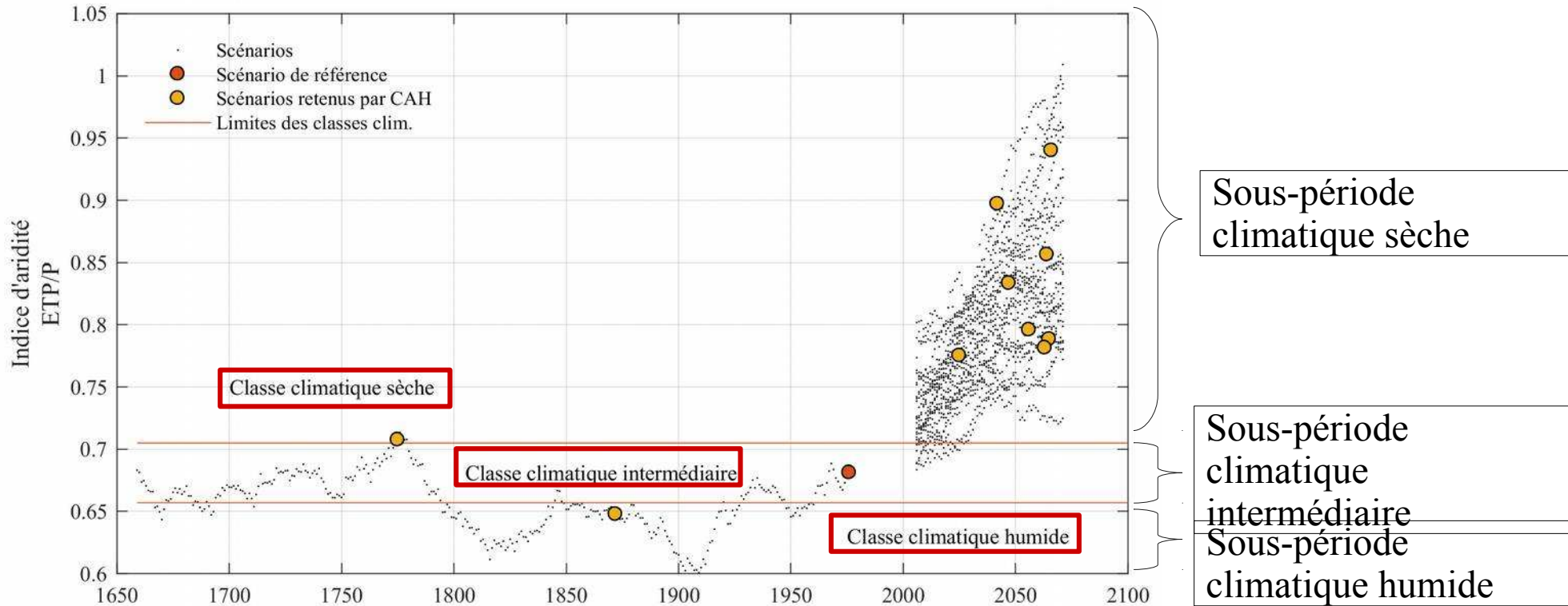


**Résultats très bons**

## Modélisation hydrologique

### Indices d'aridité des scénarios climatiques

Jeu de paramètres  
du modèle pluie-  
débit calé sur :



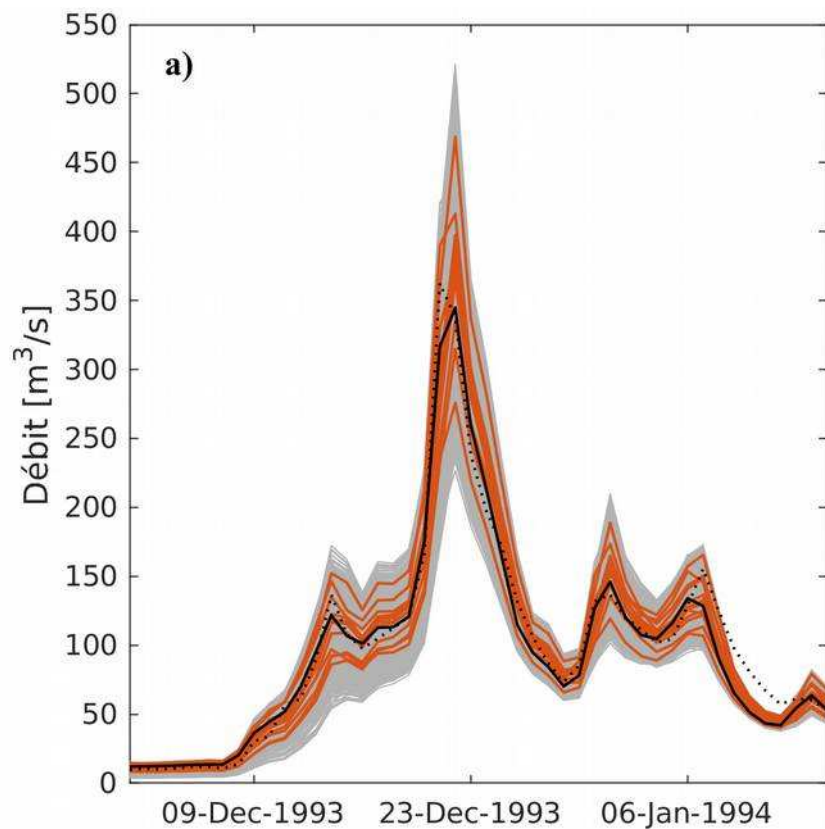
## Scénarios

- calcul de l'indice d'aridité et **attribution d'une classe climatique**
- modélisé avec le **jeu de paramètre correspondant** du modèle pluie débit
- modélisé 2 fois : **objectif 'basses eaux' et objectif 'hautes eaux'**

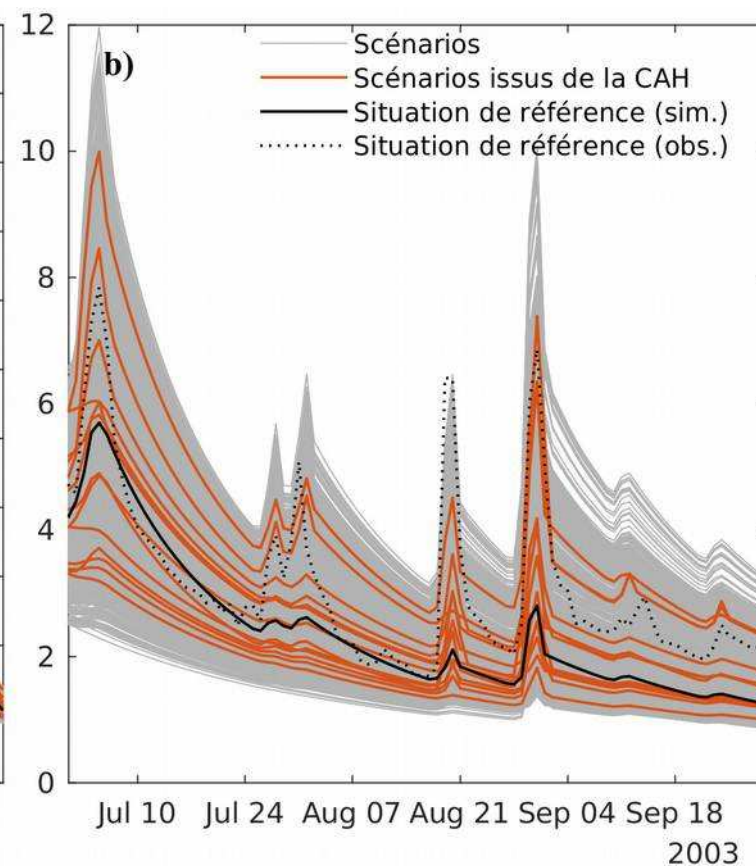
## Modélisation hydrologique

### Scénarios hydrologiques

Simulation d'événements marquants → gamme de valeurs très étendue autour de la référence



**Crue de décembre 1993**



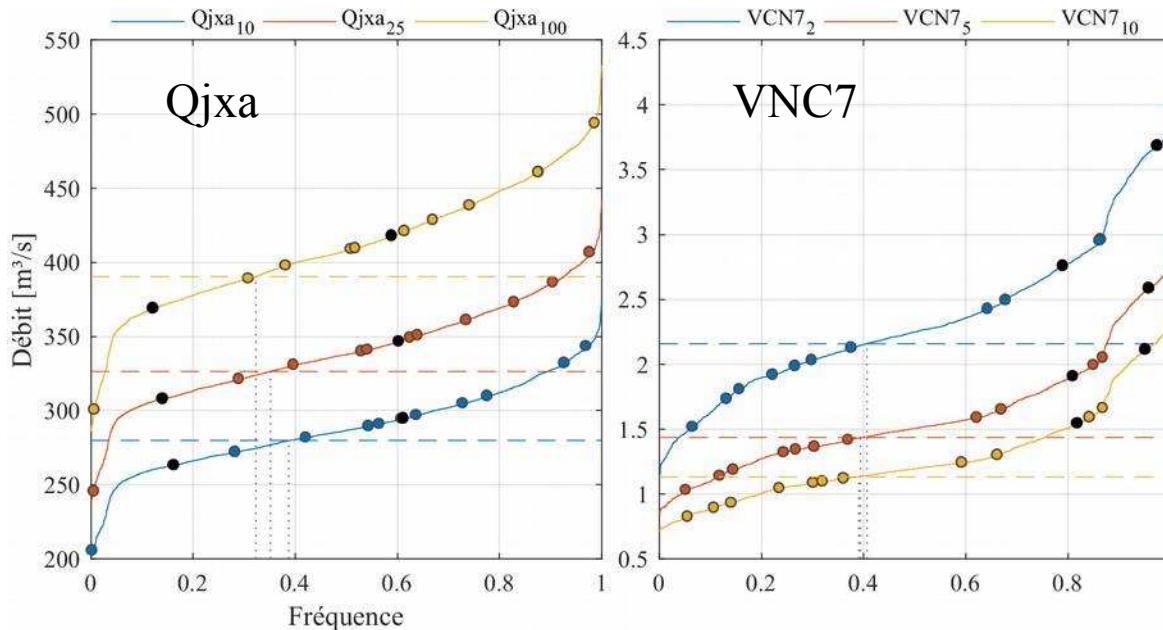
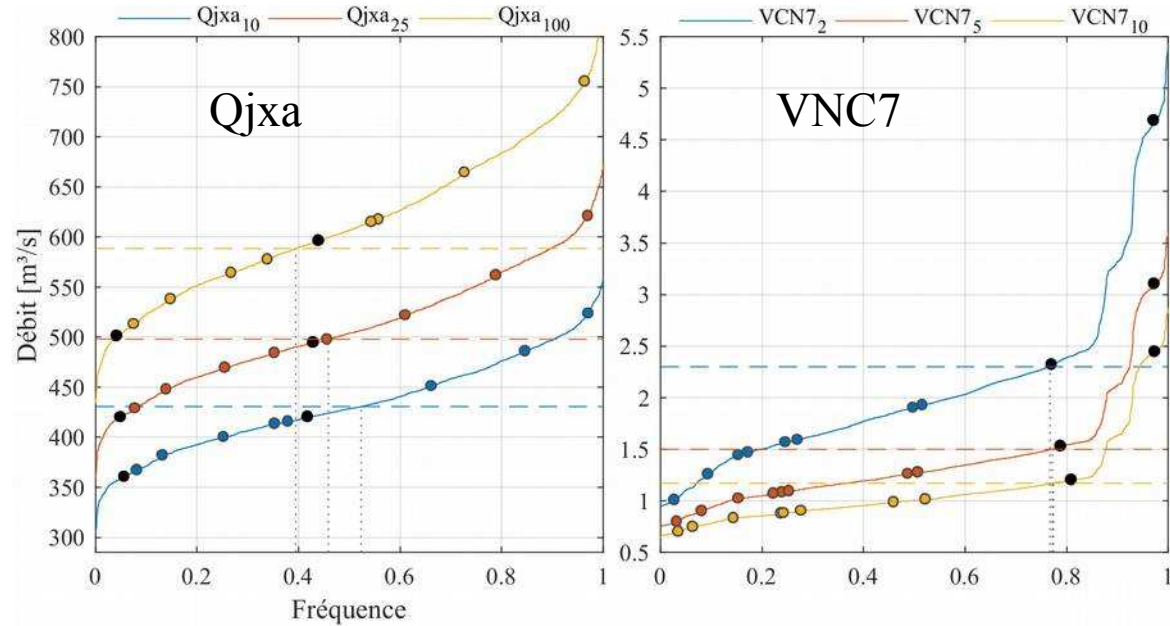
**Étiage de l'été 2003**

# Relation GRP – variabilité hydroclimatique – écoulement

## Modélisation hydrologique Scénarios hydrologiques

Analyse fréquentielle  
comparée présent vs scénarios

Débits de crue (Qjxa)  
→ majorité des scénarios :  
débits plus importants



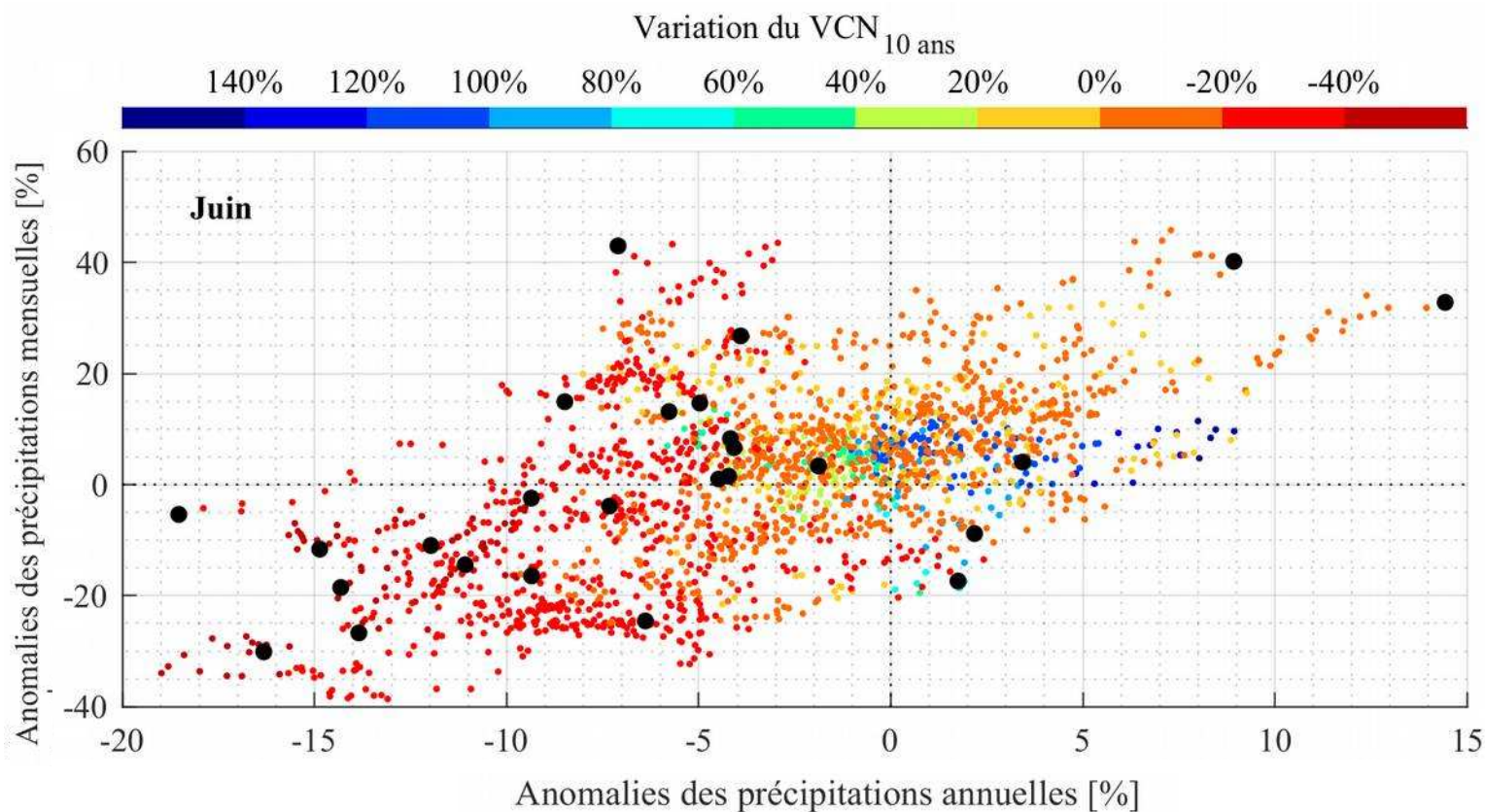
### Débits d'étiage (VCN7)

→ Meuse à St-Mihiel : en  
majorité plus secs

→ Ourthe à Tabreux : en  
majorité moins secs

## Modélisation hydrologique Scénarios hydrologiques

Surfaces de réponse :  
Ex : variation des débits caractéristiques d'été (VNC7) en fonction des anomalies de précipitations



Replacer les  
projections  
climatiques du  
GIEC dans le  
contexte de la  
variabilité  
climatique long  
terme

Permet de situer les changements  
hydrologiques dans l'espace des  
changements climatiques possibles

Scénarios considérés :  
passé → futur

## Synthèse

### Apports de l'approche

Séquençage variabilité climatique (GRP) – variables de forçage climatique – modélisation hydrologique



Performances très intéressantes

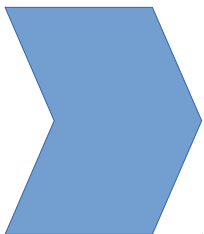
### Approche robuste



Grand nombre de scénarios (passés + multimodèles)



Modélisation hydrologique climatiquement différenciée



**Approche relativement simple à mettre en œuvre**

**Explorer l'espace des changements hydrologiques induits par la variabilité climatique potentielle**



**Quels effets du changement  
climatique potentiel sur le  
débordement de rivière ?**



# Changement climatique – débordement de rivière

## Contexte

### Terrain d'étude

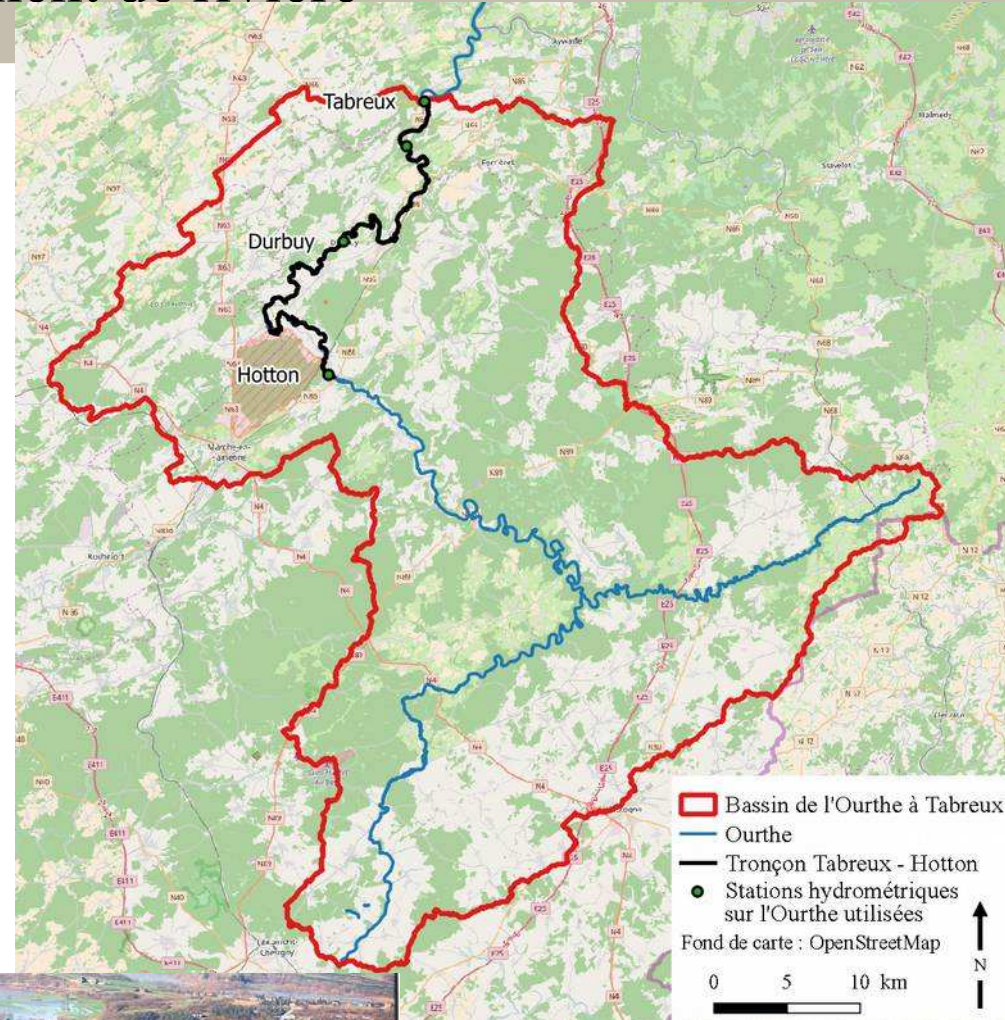
**Objectif : étudier les débordement sous climat modifié**

Bassin de l'Ourthe à Tabreux

Tronçon d'étude :  
Hotton – Tabreux (47 km)

Choix du tronçon  
→ **disponibilité de données hydrologiques, hydrauliques et topographiques**

→ **présence d'un risque d'inondation**

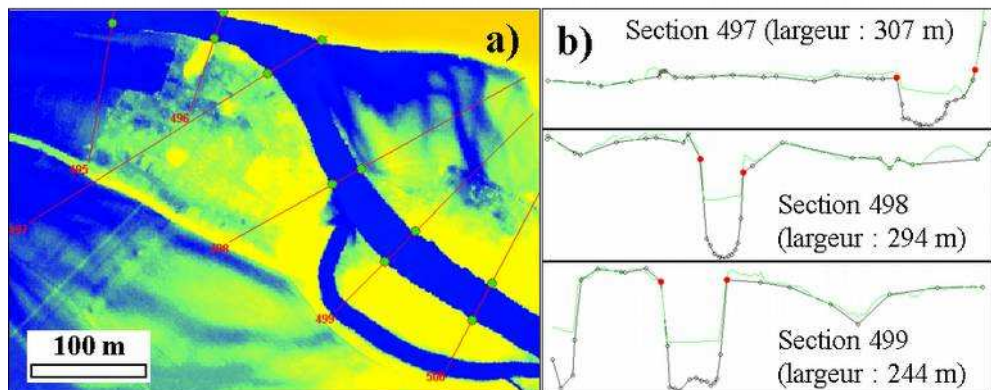
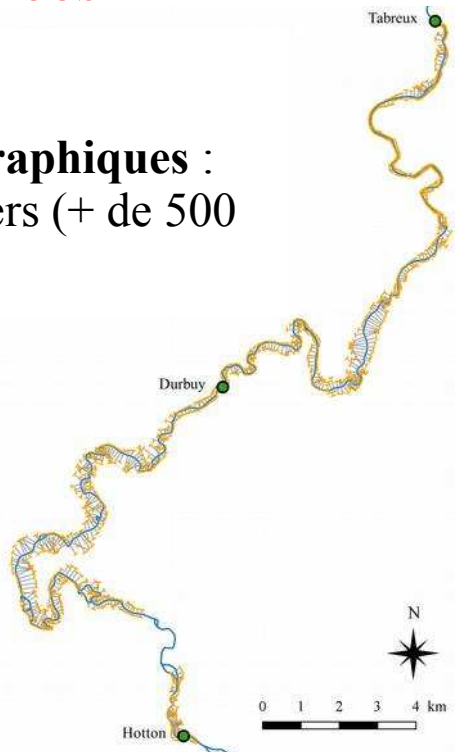


# Changement climatique – débordement de rivière

## Modèle hydraulique

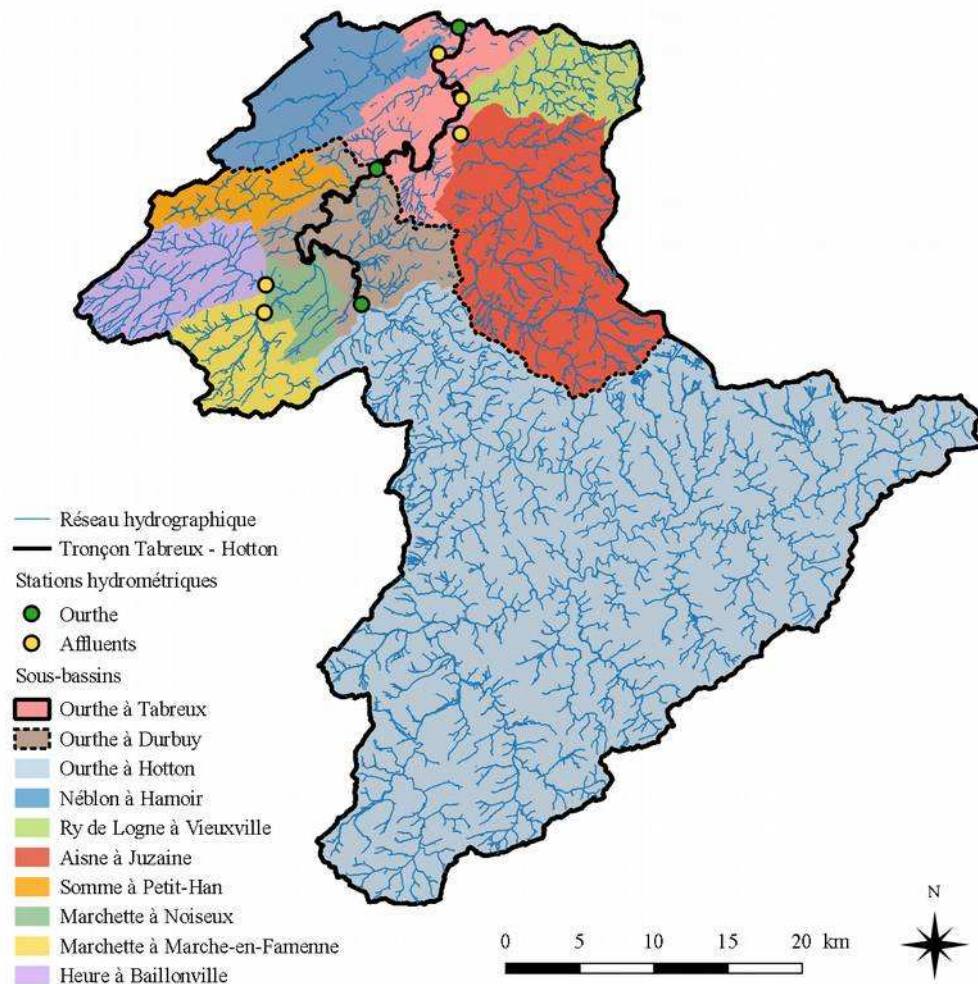
### Données

**Données topographiques :**  
sections en travers (+ de 500  
au total)



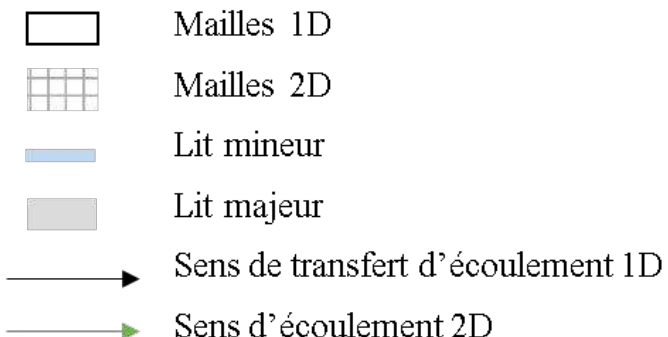
**Conditions limite amont :** bilan des apports hydrologiques et comblement du bilan si nécessaire

**Conditions limite aval :** hauteur d'eau à Tabreux, liée au débit ( → pas de hauteur d'eau en temps futur)

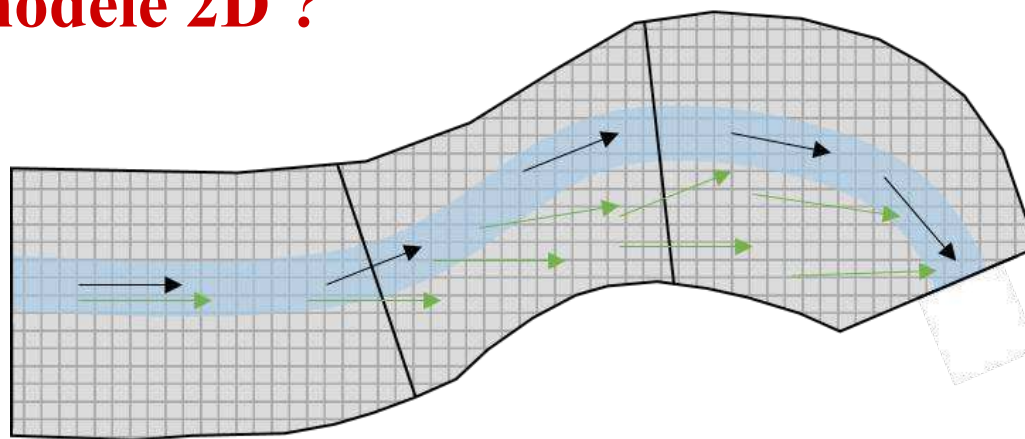


## Modèle hydraulique Choix du modèle

WOLF (suite logicielle développée au HECE, Uliège)



## Modèle 1D vs modèle 2D ?



### Modèle 1D

Avantage :

- temps de mise en place et temps de calcul+traitement

Inconvénient :

- pas de prise en compte des écoulements transversaux et latéraux (ayant lieu lors des inondations)

**Objectif de l'étude : simuler 14 scénarios sur une période de 30 ans sur un long tronçon**

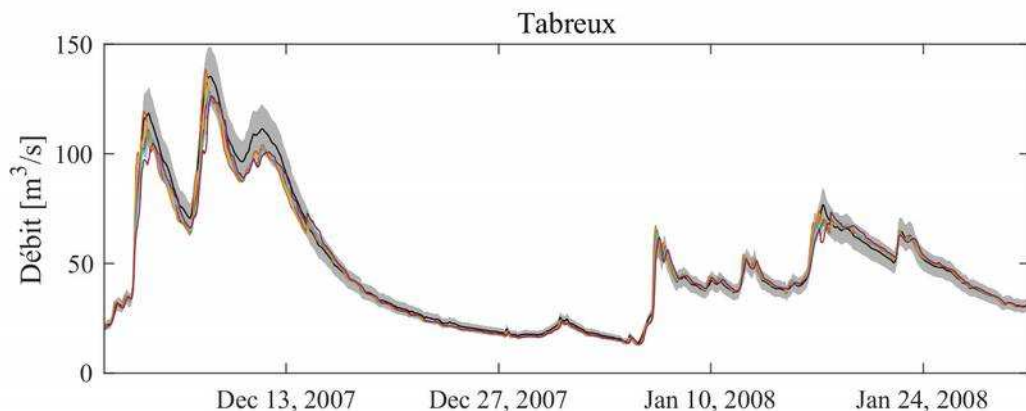
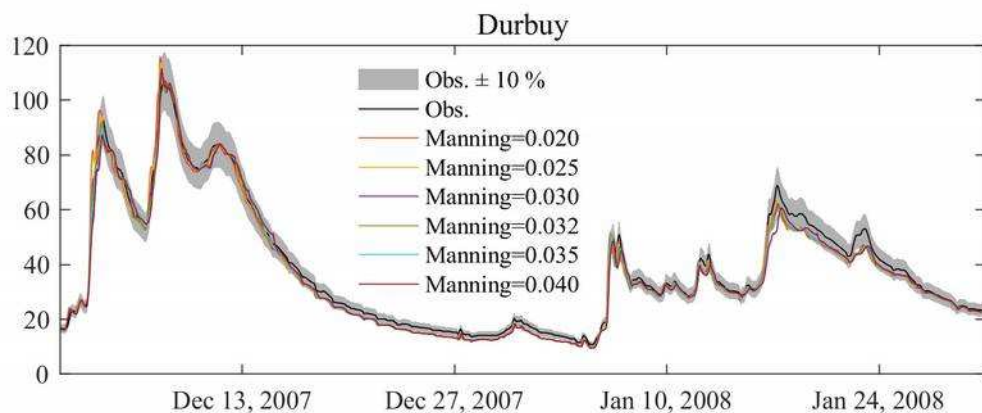


**Modèle 1D**

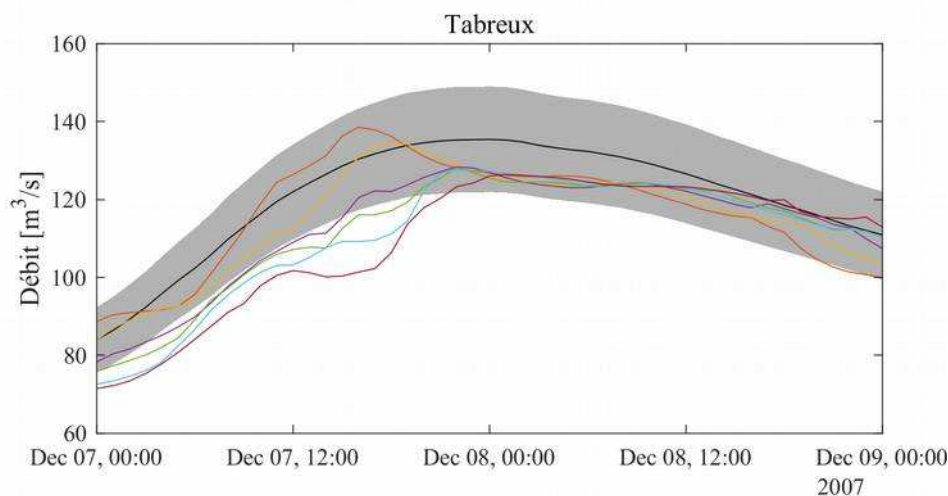
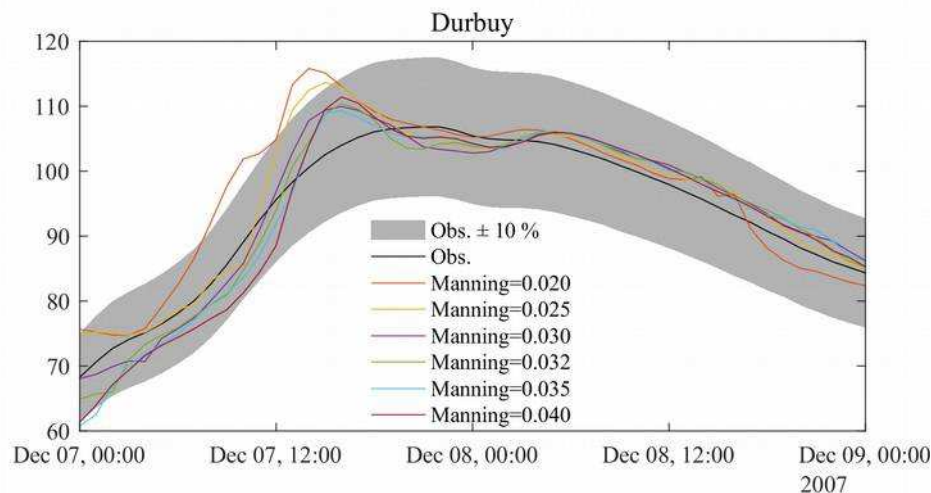
# Changement climatique – débordement de rivière

## Modèle hydraulique Calage du modèle

### Différents coefficients de Manning (rugosité) testés



## Débits dans l'ensemble relativement bien reproduits

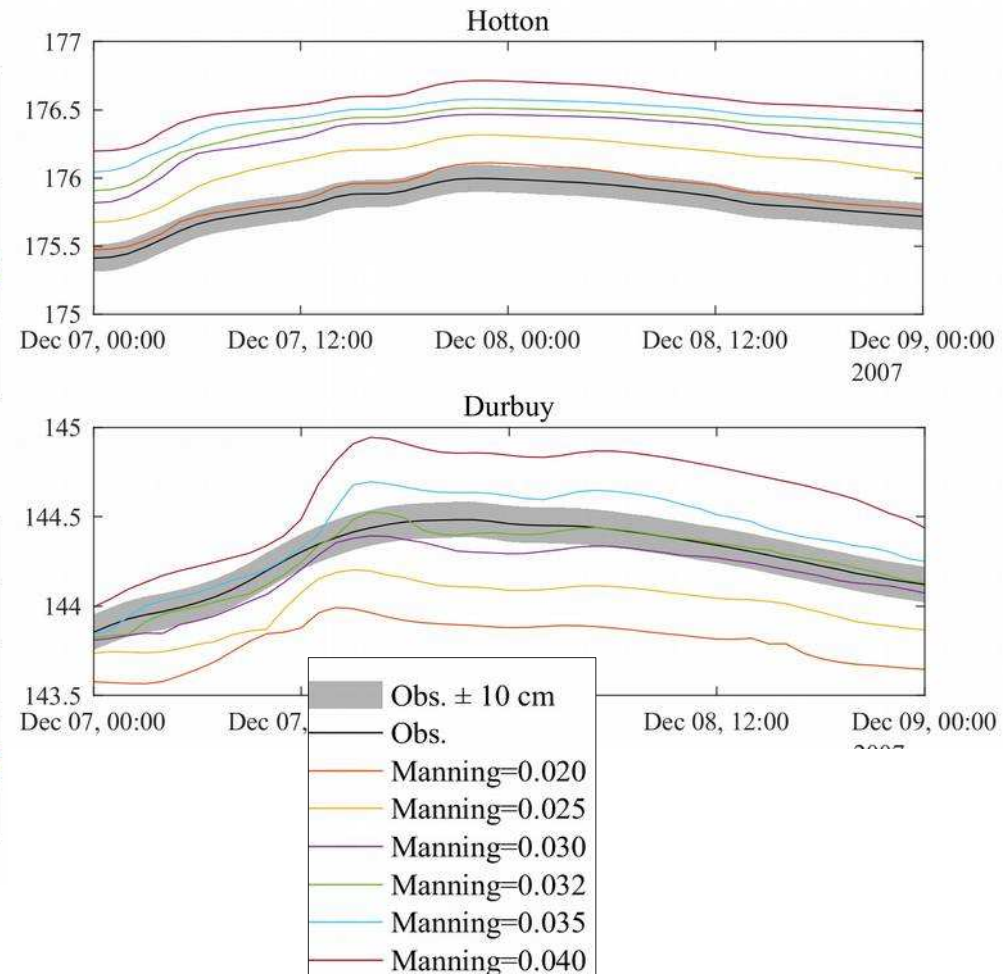
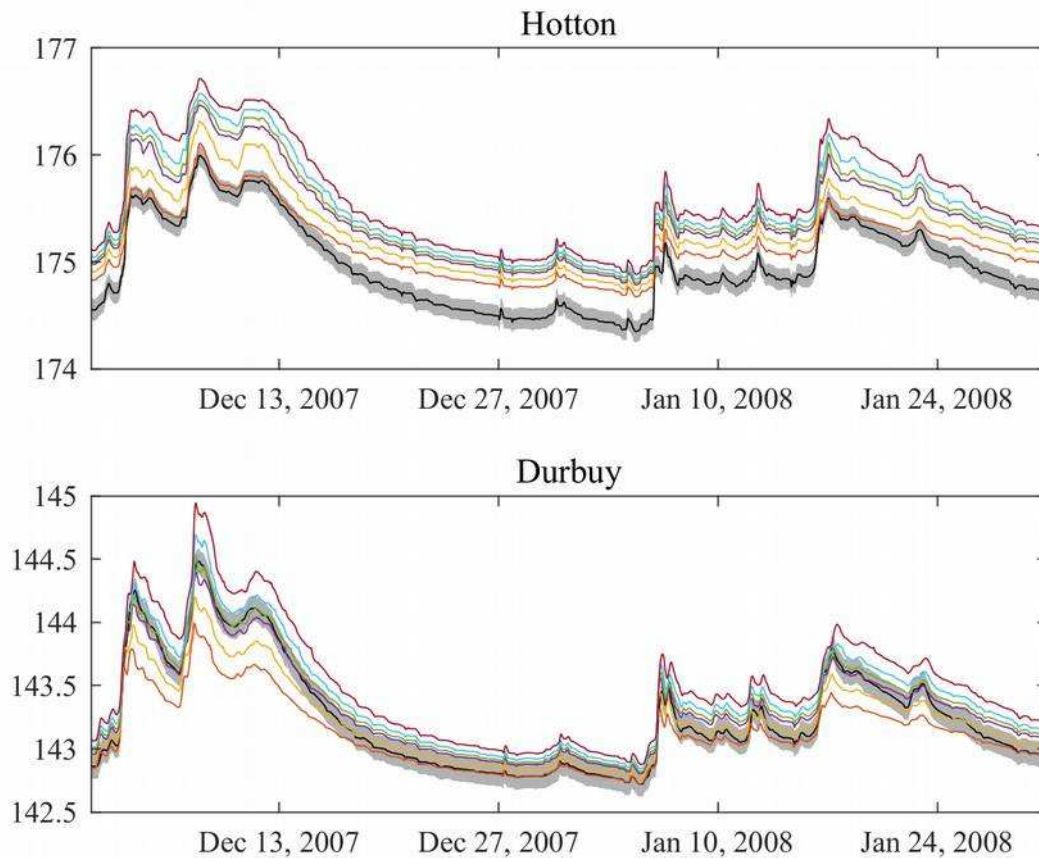


# Changement climatique – débordement de rivière

## Modèle hydraulique Calage du modèle

Différents coefficients de Manning (rugosité) testés

Hauteurs mal reproduites à Hotton et bien reproduites à Durbuy pour des coefficients de 0.030/0.032

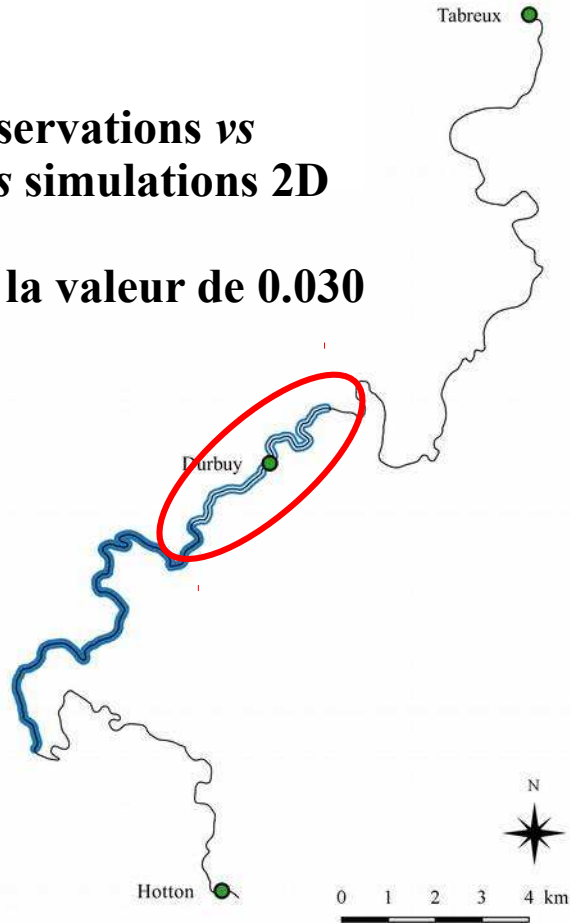


# Changement climatique – débordement de rivière

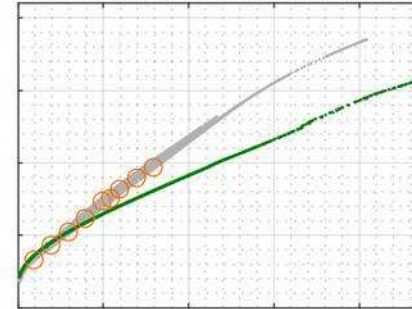
## Modèle hydraulique Calage du modèle

Comparaison observations vs  
simulations 1D vs simulations 2D

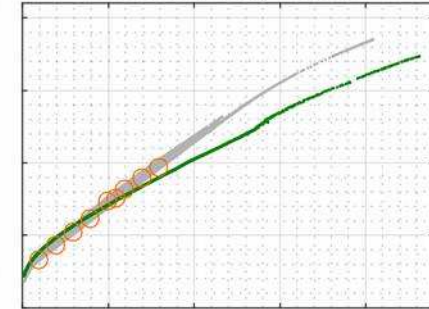
→ confirme la valeur de 0.030



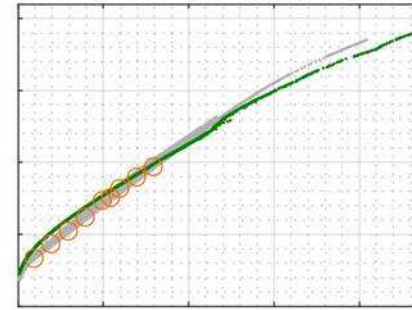
Coef. Manning = 0.02



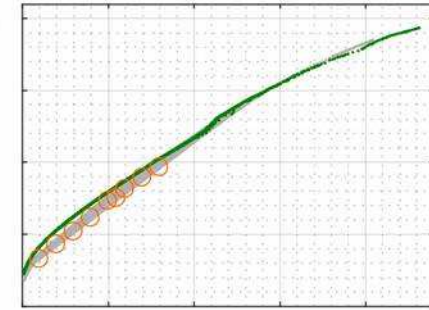
Coef. Manning = 0.025



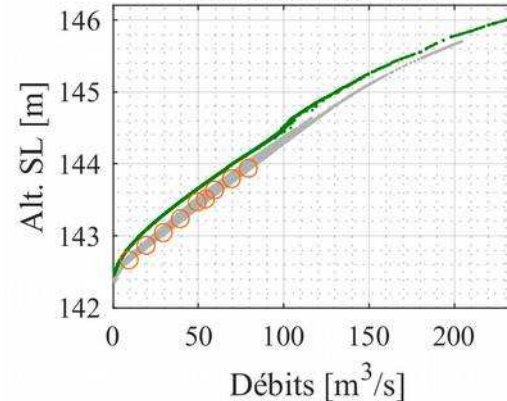
Coef. Manning = 0.03



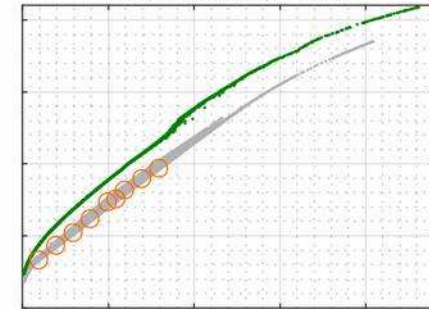
Coef. Manning = 0.032



Coef. Manning = 0.035



Coef. Manning = 0.04



· Obs.  
· Sim. (1D)  
○ Sim (2D)

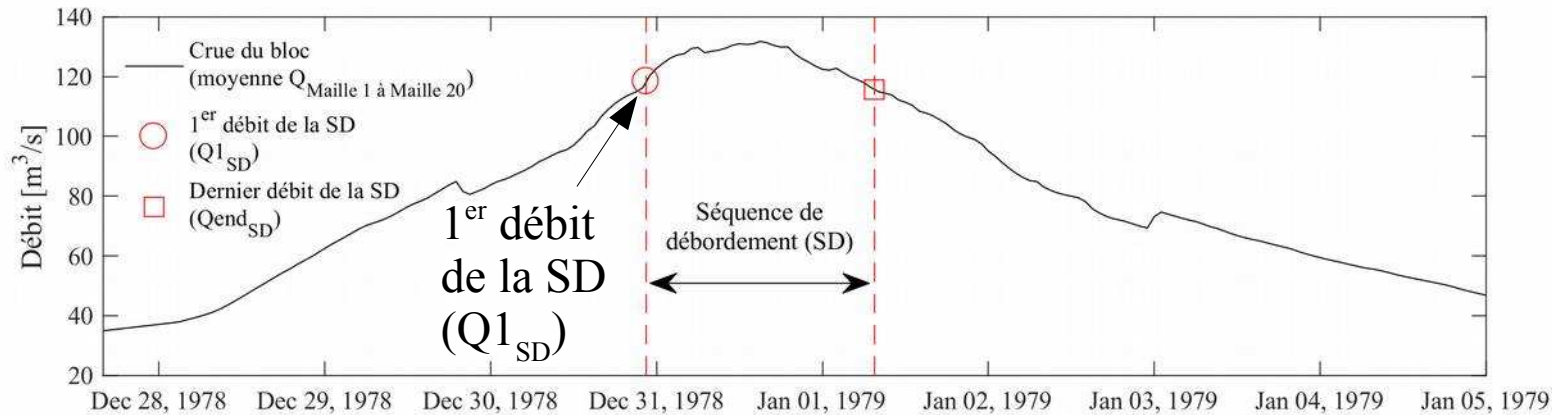
**Valeur de 0.030 retenue pour la  
simulation des scénarios climatiques**

# Changement climatique – débordement de rivière

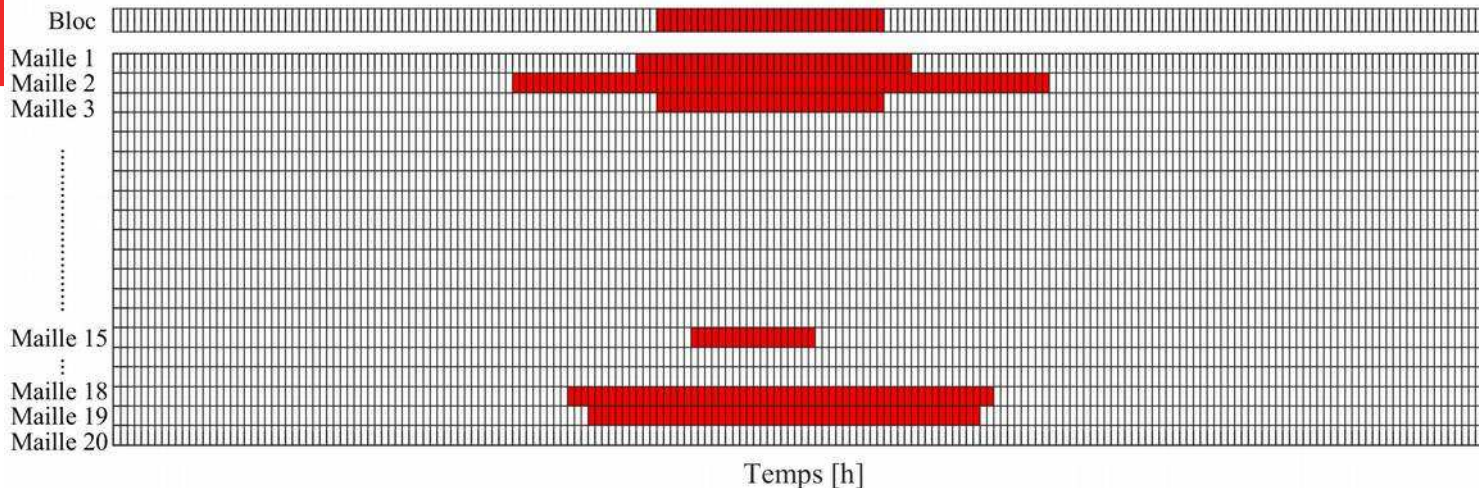
## Analyse du débordement

### Identification de séquences de débordement (SD)

Découpage du tronçon en 47 'blocs' regroupant chacun 20 mailles  
( → 1 bloc = 1 km de longueur)



**Débordement au niveau d'une maille**  
→ hauteur d'eau > hauteur des berges  
(cf. sections en travers)



**Débordement au niveau d'un bloc**  
→ **au moins 5 mailles sont débordantes**

## Analyse du débordement

### Approches

L'analyse du débordement est réalisée par bloc

#### 1ère approche :

- Les débordements sont appréhendés par les **séquences de débordement (SD)**
- Les **modifications des caractéristiques des SD** (nombre, durée) sont analysées

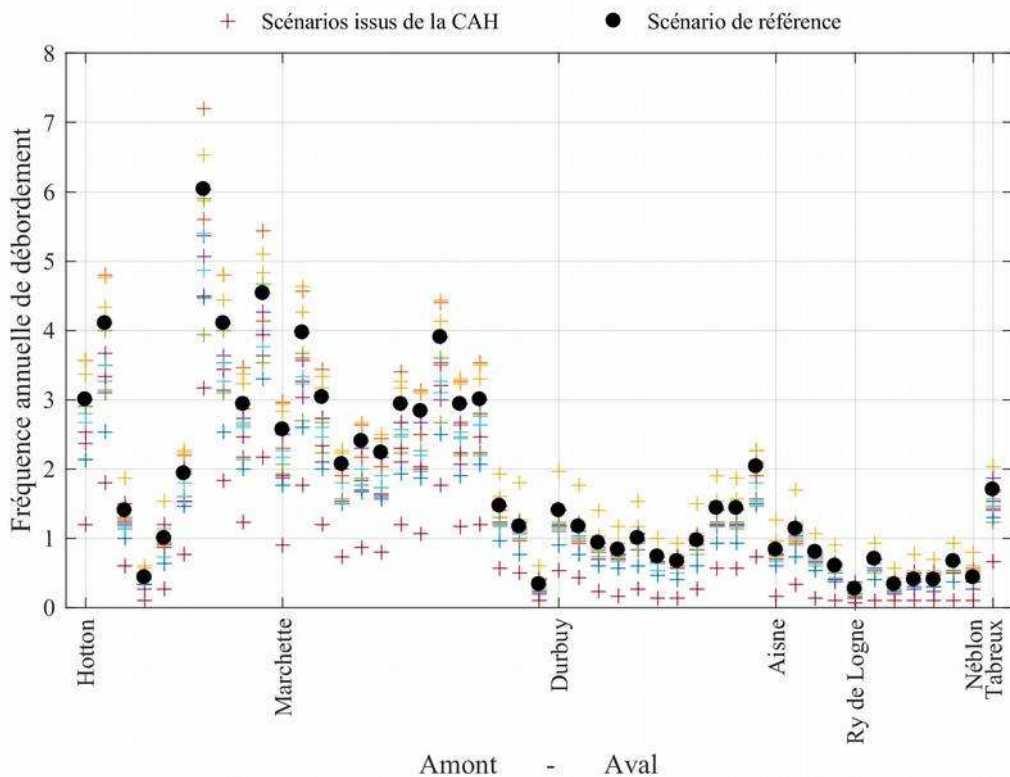
#### 2ème approche :

- Une analyse fréquentielle de type **Débit-durée-Fréquence (QdF)** est menée
- Les **modifications de fréquence et durée de dépassement du premier débit débordant ( $Q1_{SD}$ )** sont étudiées *via* l'analyse QdF

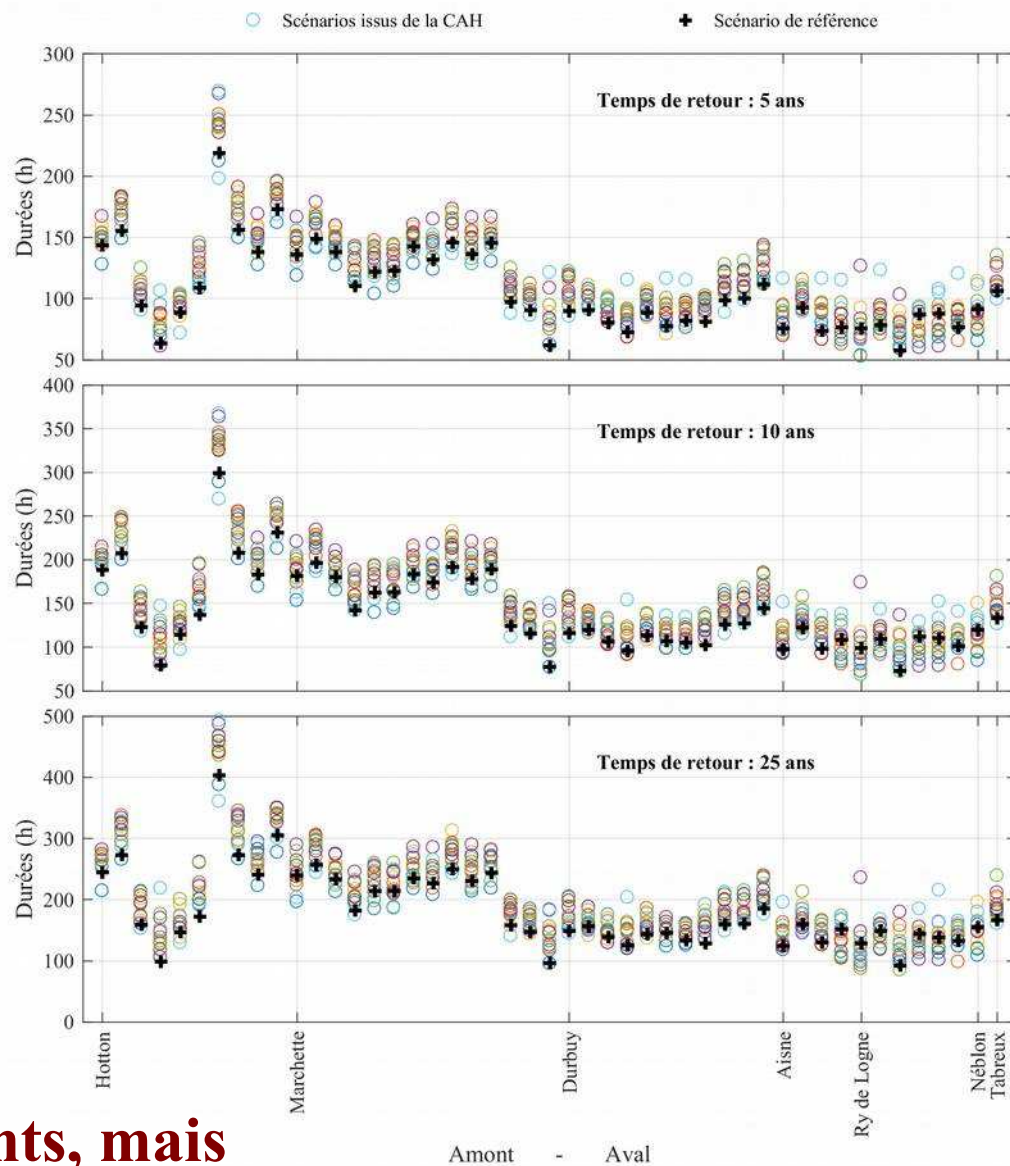


## Analyse du débordement 1ère approche

Fréquence annuelle de débordement  
(= nombre de débordements par an)  
→ moins forte dans l'ensemble



## Durée d'une séquence de débordement → accentuation à l'échelle du tronçon



→ Des débordements moins fréquents, mais plus longs ?

## Analyse du débordement 2ème approche

### Analyse QdF pour chaque bloc

Basée sur une série d'événements « **sup-seuil** »

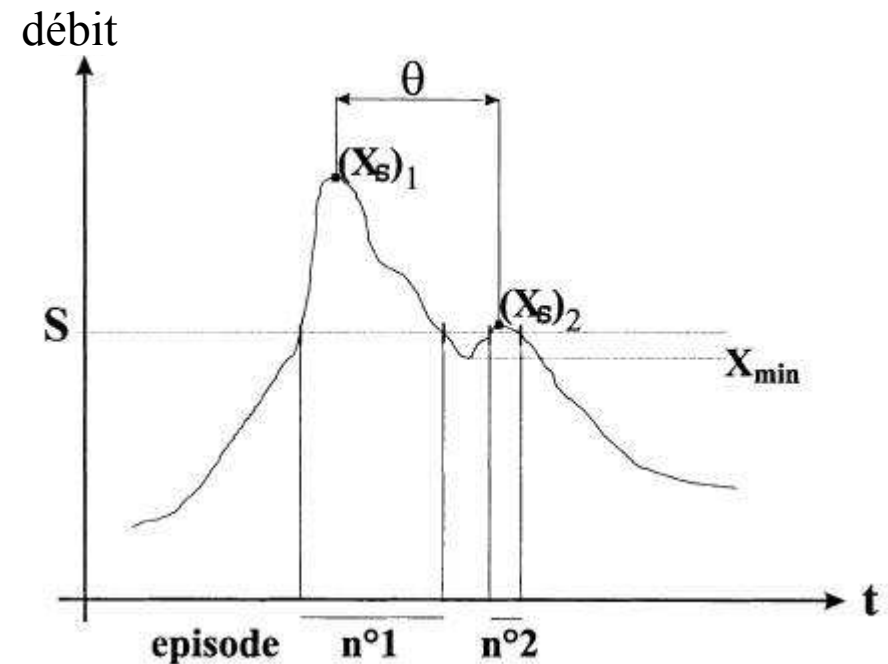
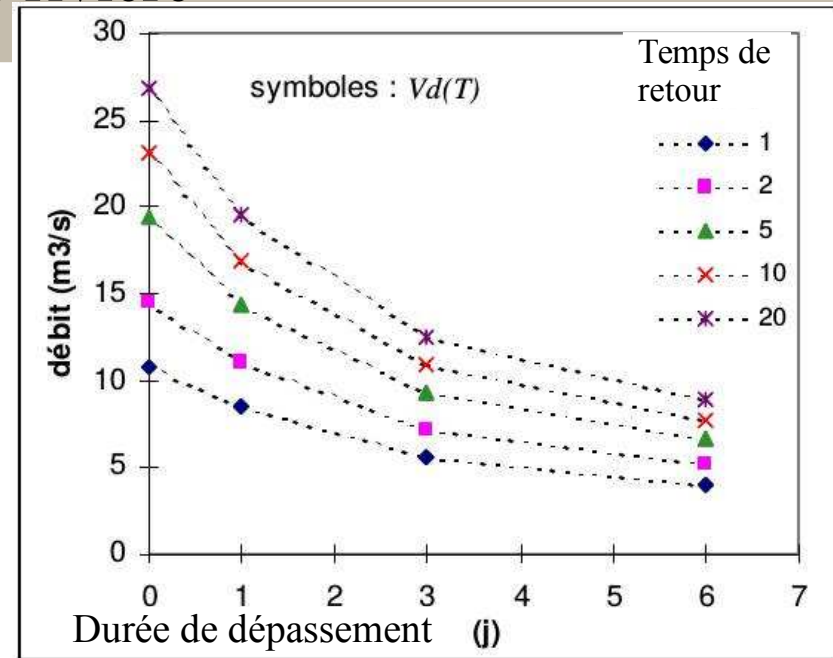
### Critères de sélections des événements

- débit seuil
- durée entre deux pics de crue
- redescente du débit entre deux pics de crue

Critères calculés pour **5 durées** d'intégration du débit (moyenne mobile)  
1h, 12h, 1j, 2j, 5j

**Séries ajustées à une loi de distribution** de Pareto généralisée

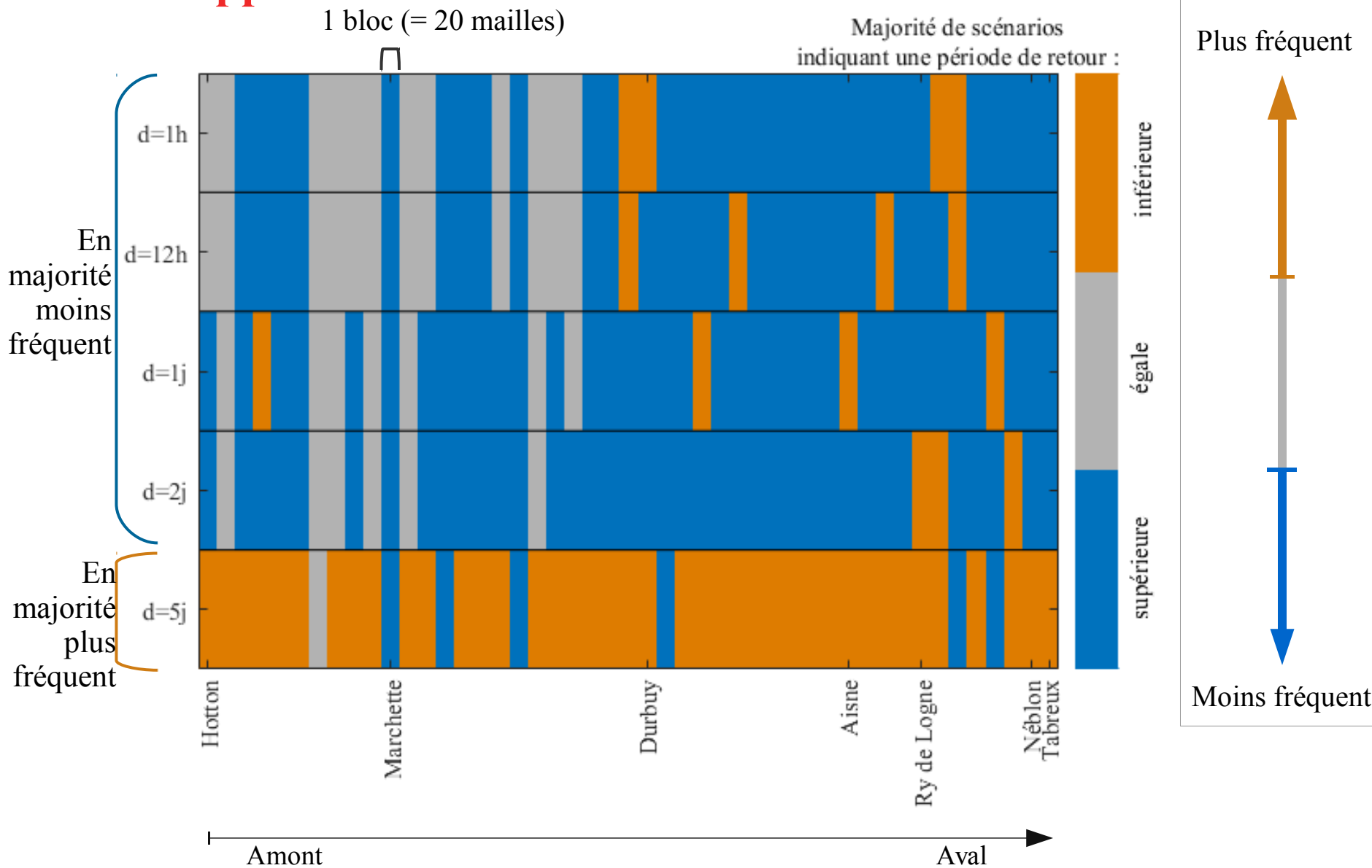
→ **Quelle évolution du  $Q1_{SD}$  en climat contrasté ?**



Que dit la tendance majoritaire des scénarios ?

## Analyse du débordement

### 2ème approche



# Conclusions et perspectives



# Conclusions

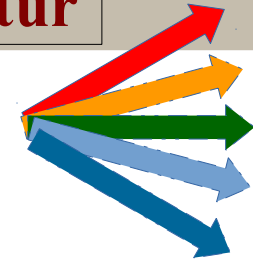
## Continuum climatique passé-présent-futur

**Variabilité  
climatique  
potentielle**

Passé



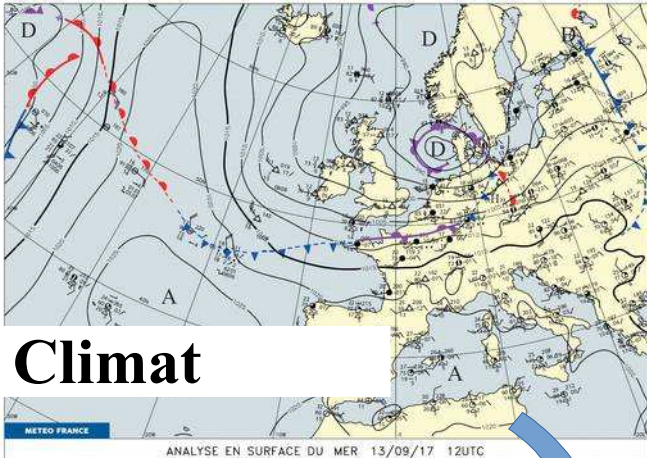
Présent



Futur ?  
Futur ?  
Futur ?  
Futur ?  
Futur ?

Bulletin Climatique Quotidien du mercredi 13 septembre 2017

MÉTÉO FRANCE



**Climat**

ANALYSE EN SURFACE DU MER 13/09/17 12UTC



**Précipitations et  
températures**



**Chaîne de  
modélisation  
robuste (multi-  
MCG, multi-  
scénarios )**



**Écoulement**

**Débordement de  
rivière**

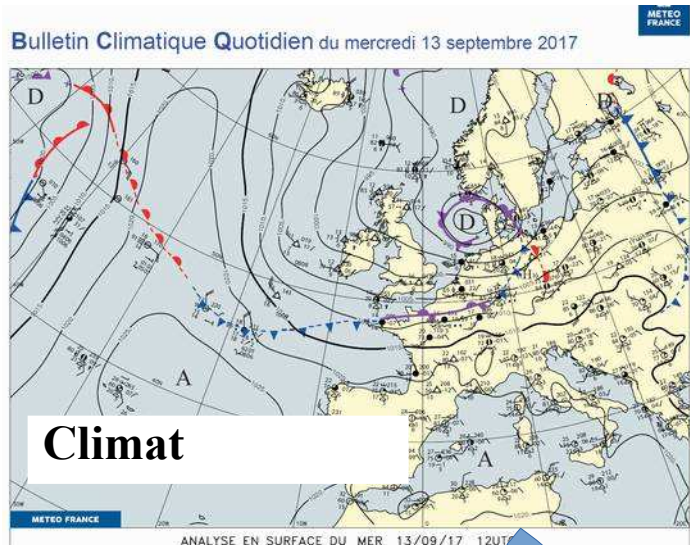


**Premier diagnostic des  
comportements potentiels de  
débordement de rivière**

- Mise en œuvre d'une **fonction de débiaisage des sorties de pression des MCGs** performante
- 
- Exploration de la **liaison** entre **variabilité climatique** et **variabilité hydrologique**
  - ✦ **Liaison directe GRP – écoulement**
    - Performances intéressantes mais **faiblesses du GRP à reproduire la variabilité interannuelle de certains indices hydrologiques**
  - ✦ **Liaison séquencée GRP – variables de forçage climatique – modélisation hydrologique**
    - **GRP très performant**
    - **Procédure de calage climatiquement différenciée**
    - **Construction de l'espace des changements hydrologiques possibles**

- Mise en œuvre d'un **modèle hydraulique 1D** pour **transférer la variabilité climatique long terme au débordement de rivière**
  - **Performances encourageantes de l'approche 1D** et pertinence à l'échelle d'un tronçon hydrographique
  - Apport de l'**analyse QdF** pour l'**analyse du débordement**
  - Proposition d'une **gamme de changements potentiels des débordements**

**Augmenter le panel des sorties  
MCG (modèles, scénarios, runs)**



**Précipitations et  
températures**



**Augmenter la  
« bonne  
incertitude »**

**Reproduire l'étape de  
modélisation  
hydrologiques avec  
plusieurs modèles**



**Écoulement**



**Débordement de rivière**



Climat



**Précipitations et températures**



**Affiner la modélisation hydraulique en plaine inondable**



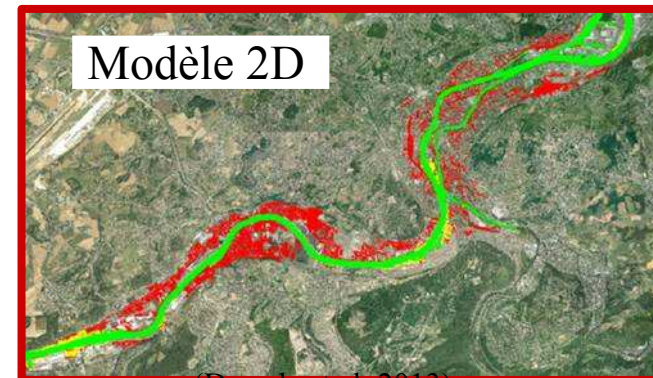
**Écoulement**



**Débordement de rivière**



**Identification des zones à enjeux révélées par la modélisation 1D**  
**Cartographie précise des zones inondées**

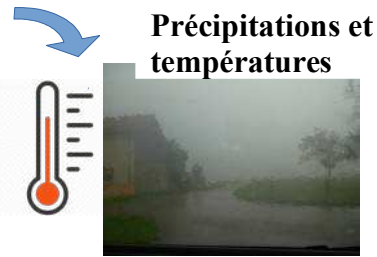


(Dewals et al, 2013)

# Perspectives

## Tester la « résilience climatique » d'aménagements de rivière

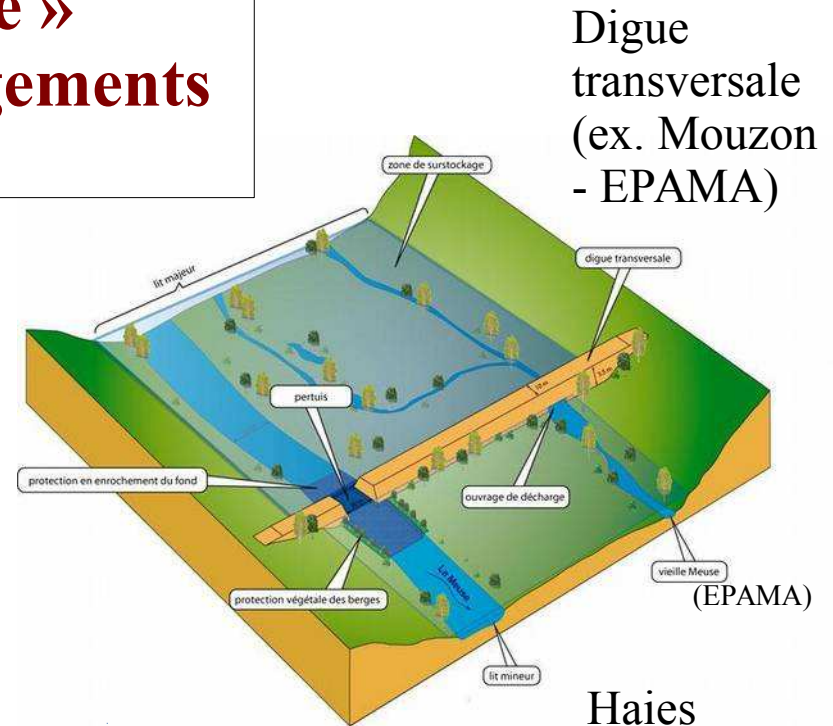
Climat



### Adapter le modèle 1D



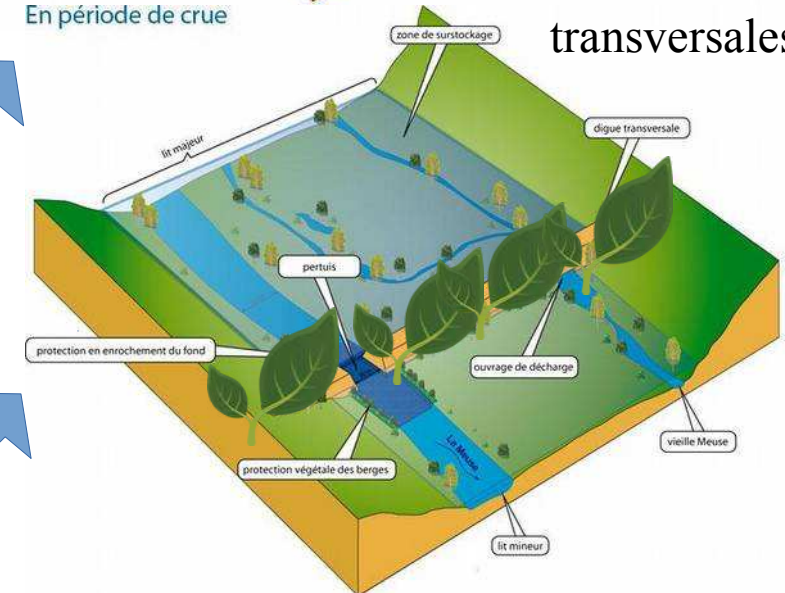
(essais expérimentaux - Adriaens, 2017)



Digue transversale (ex. Mouzon - EPAMA)

En période de crue

Haies transversales



(Merwade et al, 2008)

## Vers la définition d'une « **marge de sécurité climatique** » dans les documents de planification et de gestion du risque hydrologique ?

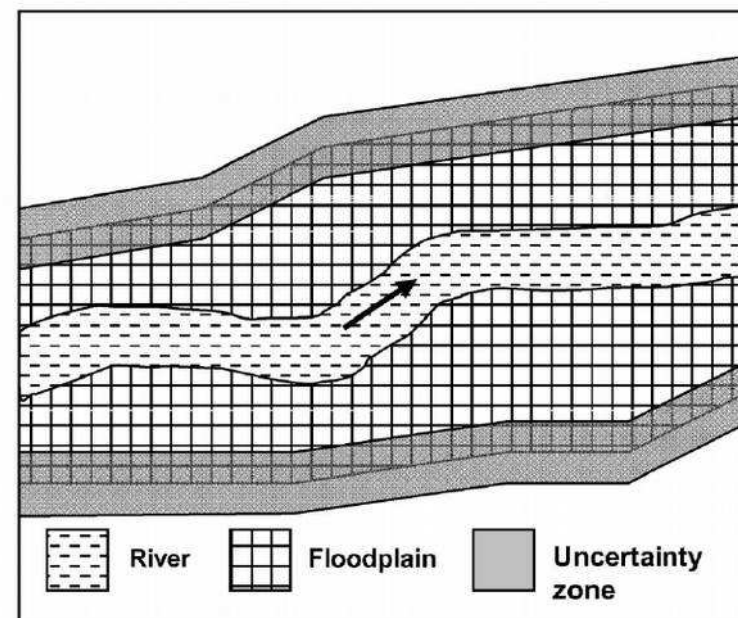
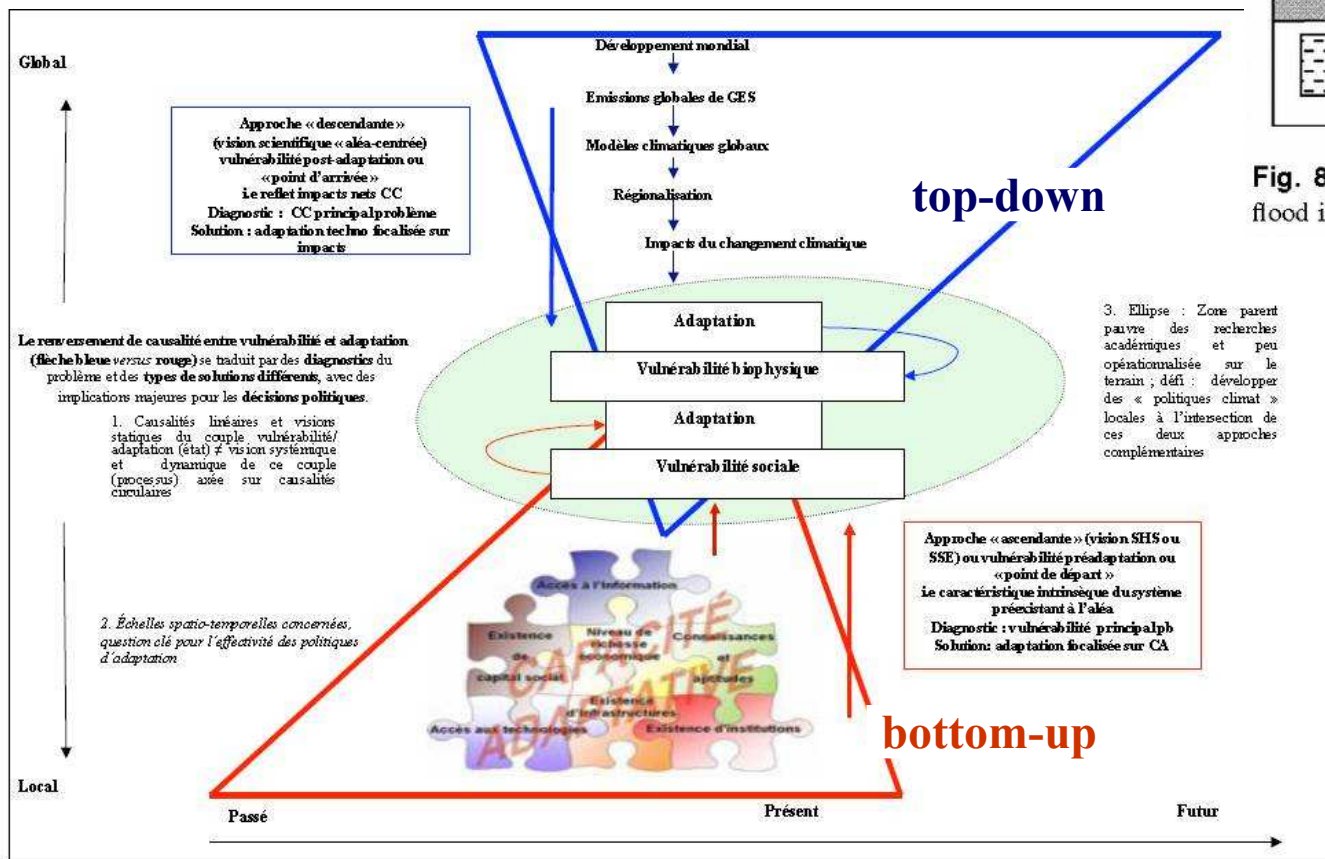


Fig. 8. Flood inundation map with uncertainty zone (probabilistic flood inundation map)



Coupler cette approche avec des approches "bottom-up" portant sur la vulnérabilité sociale



**Merci de votre attention !**