



XXIX<sup>e</sup> Colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC)  
Besançon, France, du 06 au 09 juillet 2016,

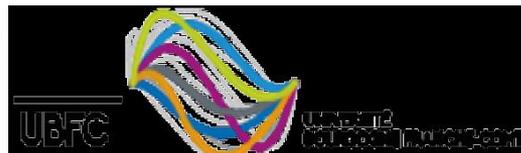
# IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES RESSOURCES EN EAU DU BASSIN DE LA CASAMANCE

**Ansoumana BODIAN<sup>1</sup>, Maurizio BACCI<sup>2</sup> et Mbaye DIOP<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Laboratoire Leïdi, Université Gaston Berger, Saint Louis, Sénégal

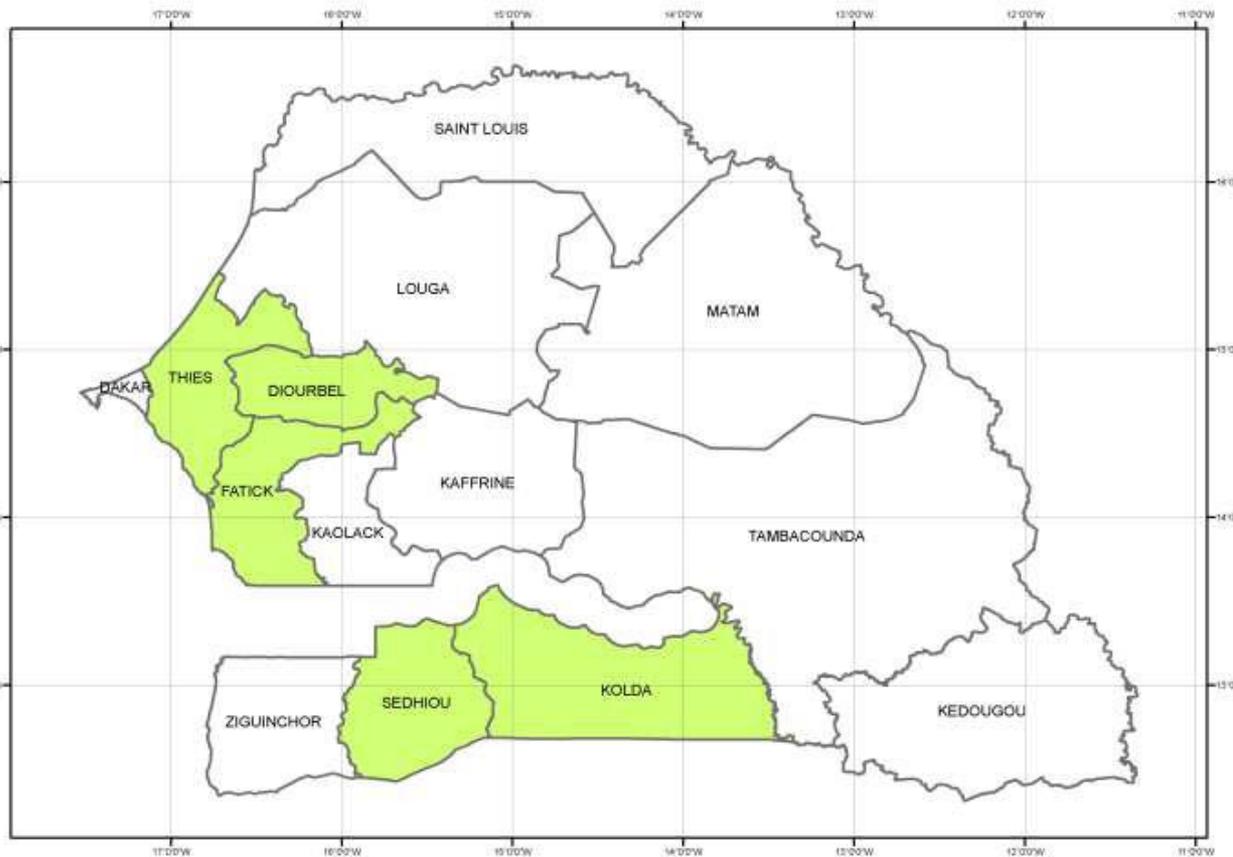
<sup>2</sup> IBIMET, CNR

<sup>3</sup> Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA)



# Contexte de l'étude

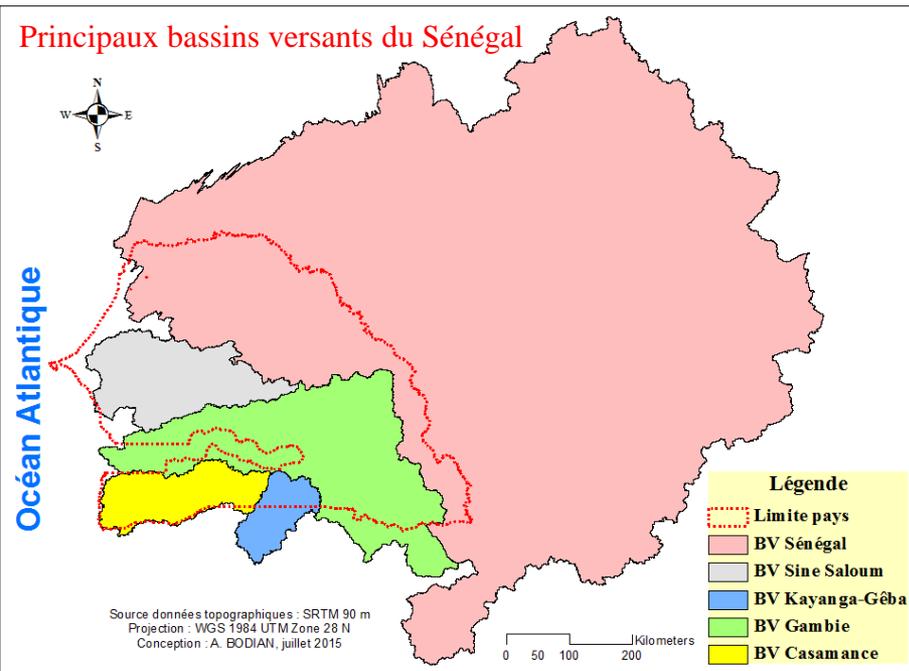
Etude réalisée dans le cadre des activités du projet PAPSEN (Programme d'Appui au Programme National d'Investissement en Agriculture du Sénégal)



Zone d'intervention du PAPSEN (deux zones d'intervention : zone centre et la zone sud)

**L'objectif général du PAPSEN est de comprendre comment la dynamique actuelle et future du climat peut affecter l'agriculture dans les deux zones?**

# Contexte de l'étude



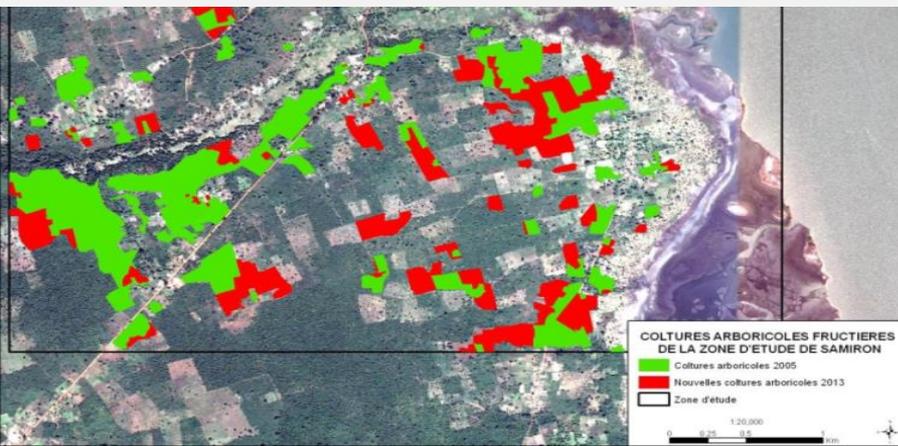
Zone sud du projet localisation dans le bassin de la Casamance (moyenne Casamance)

Pour la zone sud, il s'agissait d'analyser le climat actuel, les changements climatiques (CC) et leurs impacts sur les différents systèmes de production, sur l'agro-biodiversité et sur les ressources en eau de la moyenne Casamance.

Vallée rizicole (Fiorillo et al., 2015)



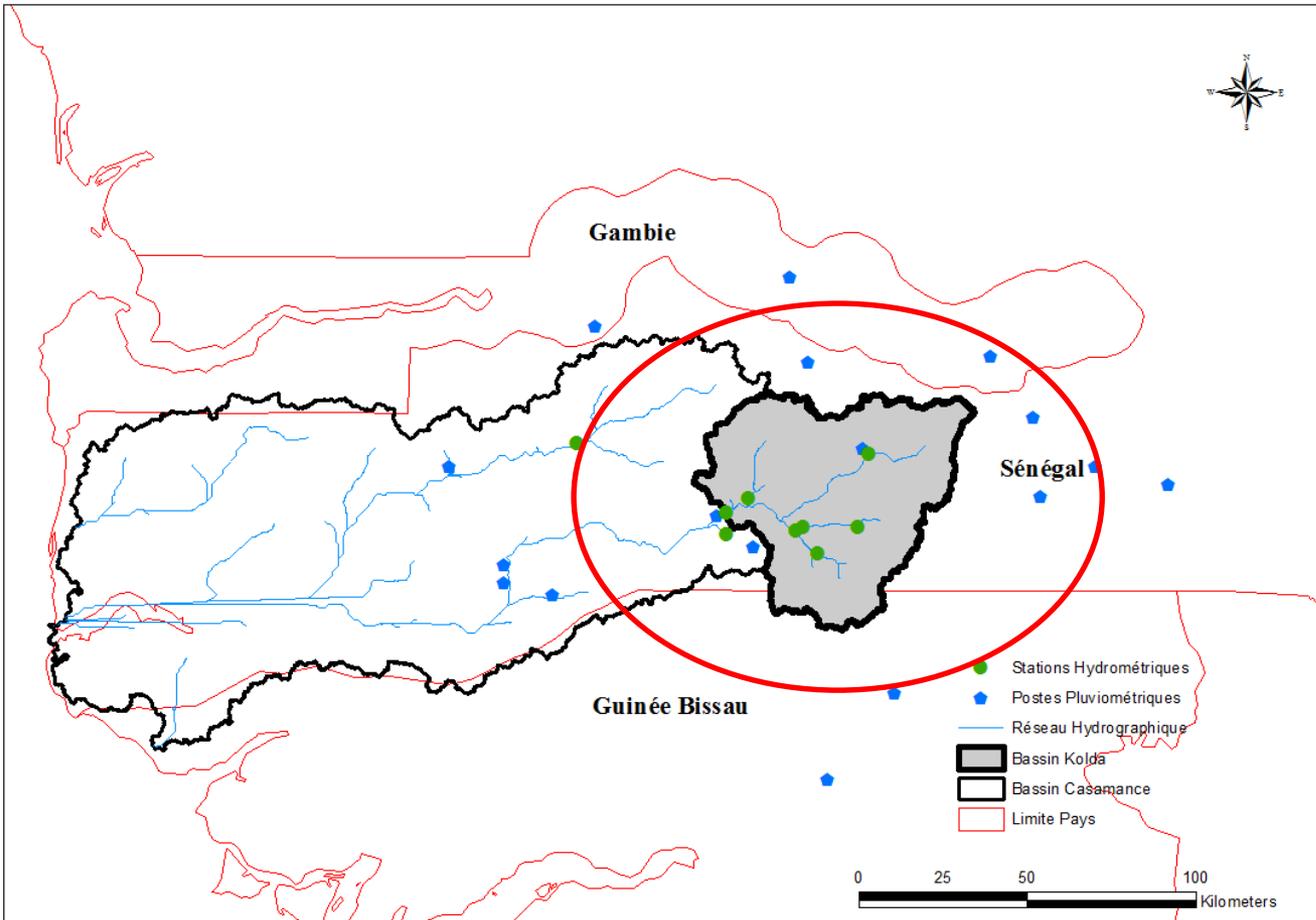
Cultures arboricoles fruitières pour la zone de Samiron (2005-2013-Fiorillo et al., 2015)



Les vallées du fleuve Casamance sont des zones particulièrement appropriées pour la production de riz mais aussi pour des cultures maraichères de contre saison

# Objectifs de l'étude

Zone d'intervention du PAPSEN : Kolda et Sèdhiou = moyenne Casamance



L'objectif de l'étude, c'est d'évaluer les impacts potentiels du changement climatique sur l'évolution des ressources en eau

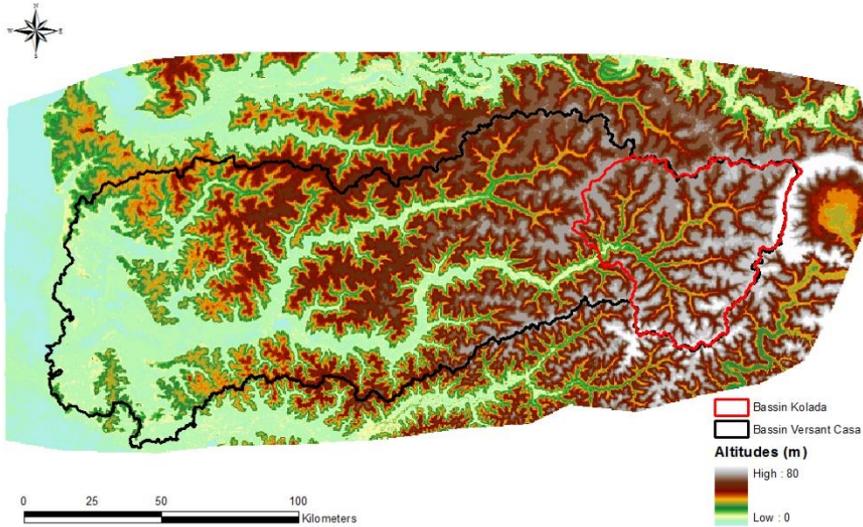
Bassin de la Casamance à Kolda contrôle les apports en eau à la moyenne Casamance qui est la zone d'intervention du PAPSEN

18% de la superficie totale du bassin de la Casamance

Situation du bassin versant de la Casamance à Kolda

# Zone d'étude

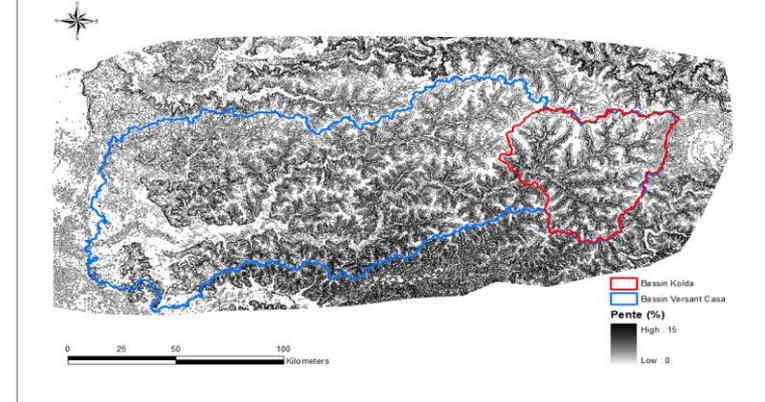
MNT du bassin de la Casamance (Source : SRTM 90m)



Bassin de la Casamance à Kolda :

- Surface: 3653 Km<sup>2</sup>
- Altitudes: 10 à 80 m
- Pentes comprises entre 0 et 15 %

Distribution des pentes (Source : SRTM 90m)



Paramètres physiographiques des bassins versants : (Kc : indice de compacité de Gravélius ; L (km) : longueur du rectangle équivalent ; I (km) : largeur du rectangle équivalent ; IG (m/km) : indice de pente globale ; D (m) : dénivelée ; D (m) : dénivelée spécifique)

Bassin Versant	Surface (km <sup>2</sup> )	Périmètre (km)	Kc	L (km)	I (km)	IG (m/km)	Altitude max (m)	Altitude min (m)	D (m)	Ds (m)
Bassin Casamance	19652	1496	3	720	27,3	0,11	80	0	80	15,6
Bassin Kolda	3650	431	2	197	18,5	0,36	80	10	70	21,5

- Faiblesse des pentes
- Baisse des écoulements de la partie continental du bassin
- Forte intrusion marine et salinisation des terres agricoles

# Outil : Modèle GR2M

Modèle choisi : GR2M (Makhlouf et Michel., 1994; Mouelhi et al., 2006b)

Modèle conceptuel global -Pas de temps mensuel

GR2M largement utilisé en contexte africain (Paturel et al., 1995; Ouedraogo et al., 1998; Ardoin-Bardin, 2004; Mahé et al., 2005; Bodian et al., 2012 et 2015) .

Choix du modèle contraint par la taille du bassin (3653 Km<sup>2</sup>) et la disponibilité des données .

Deux paramètres:

-**X1** (fonction de production)

-**X2** (fonction de transfert)

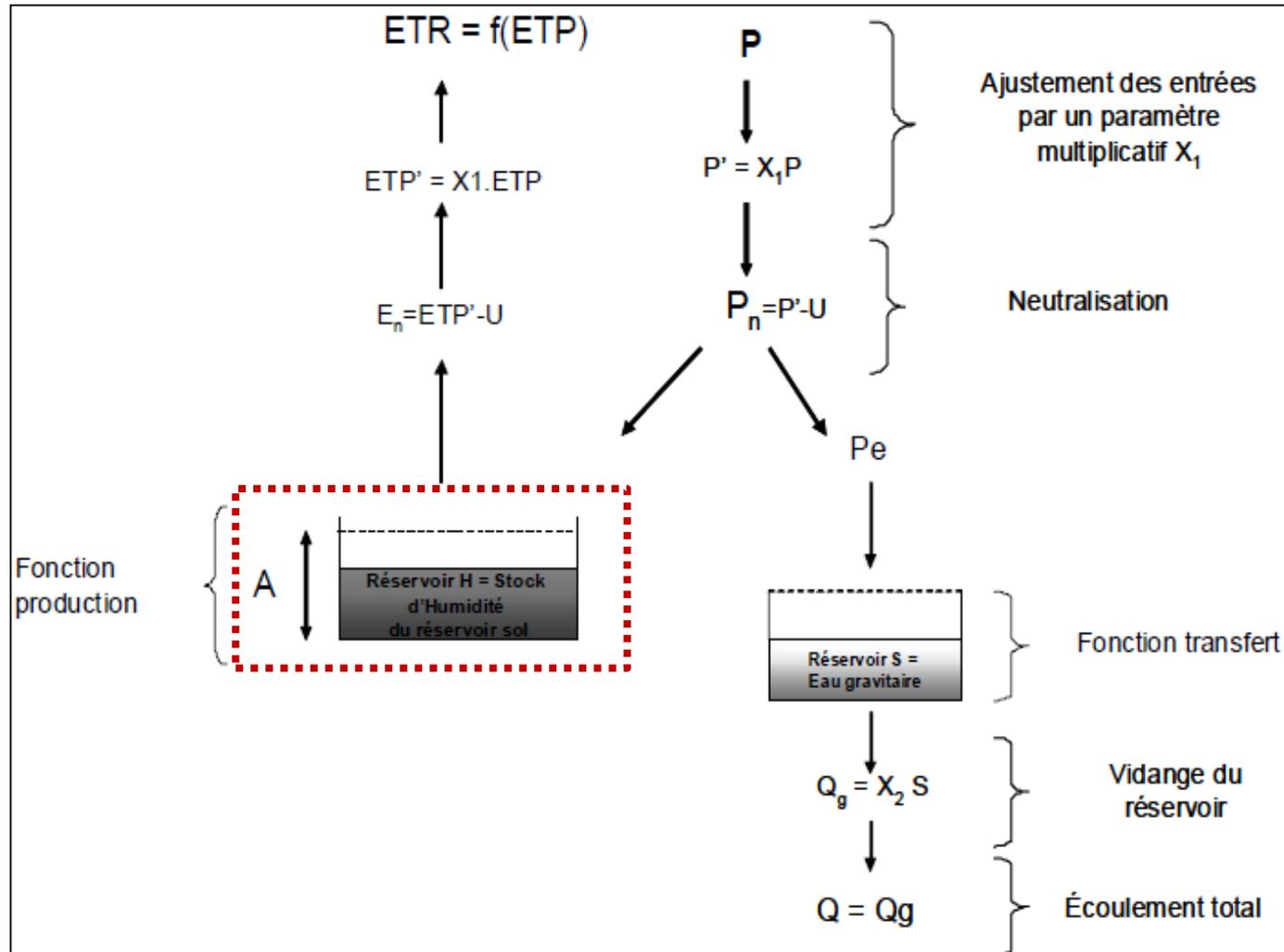


Schéma conceptuel du modèle GR2M (Dezetter et al., 2010)

# Présentation des données

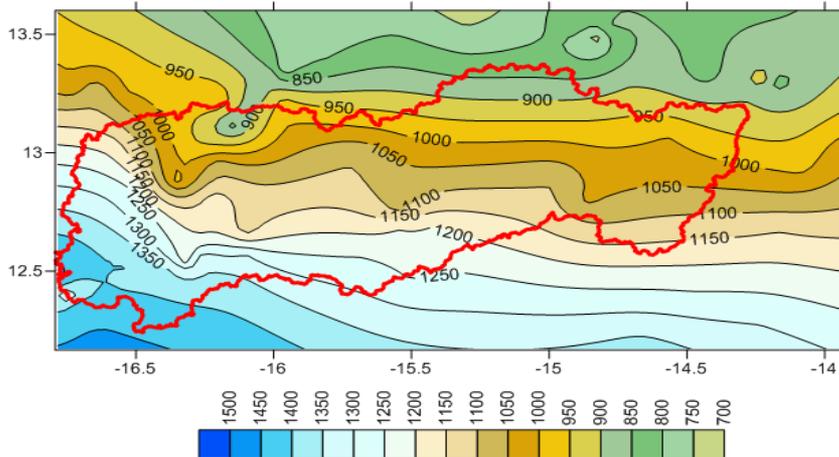
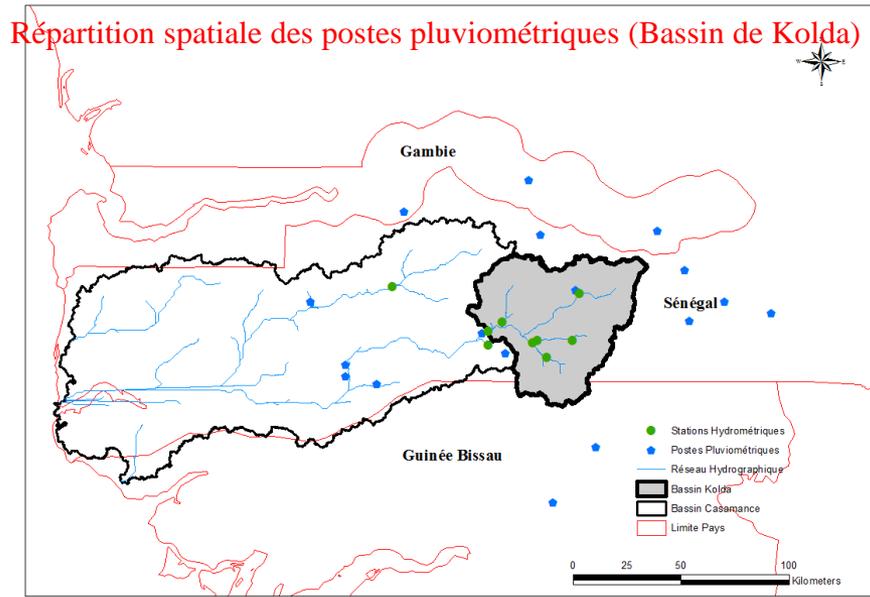
---

## GR2M: données nécessaires

- les données de précipitation
- les données d'Evapotranspiration (ETP)
- les données hydrométriques
- CC projections de pluies et de température

# Données climatiques (pluie et ETP)

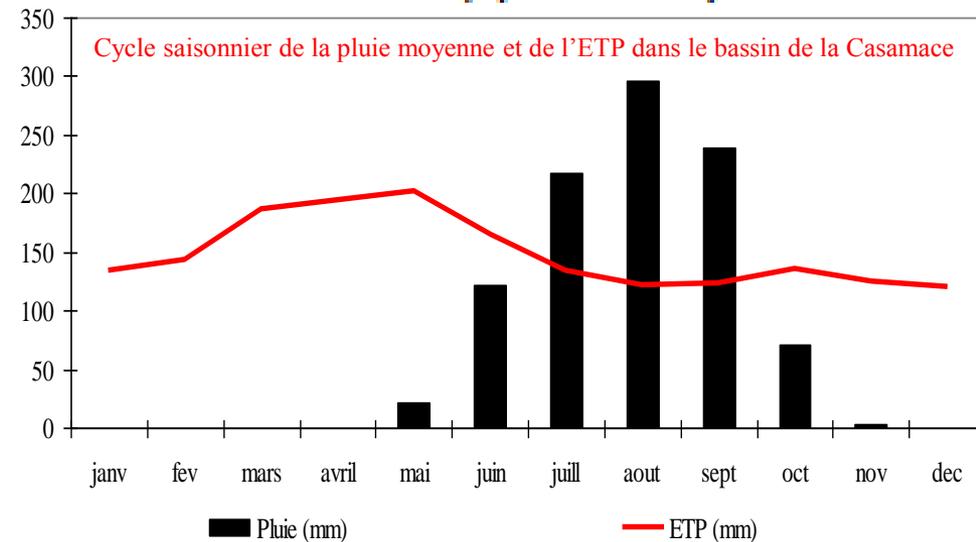
## Données climatiques observées



Répartition spatiale de la pluie moyenne annuelle (1950-2006)

- 17 stations pluviométriques utilisées
- Elles couvrent la période 1964-2007
- Calcul de la pluie moyenne du bassin par la méthode du Krigeage (Baillargeon, 2005)
- ETP calculé selon la formule de Penman (1948) à partir des paramètres climatiques de la station synoptique de Kolda.

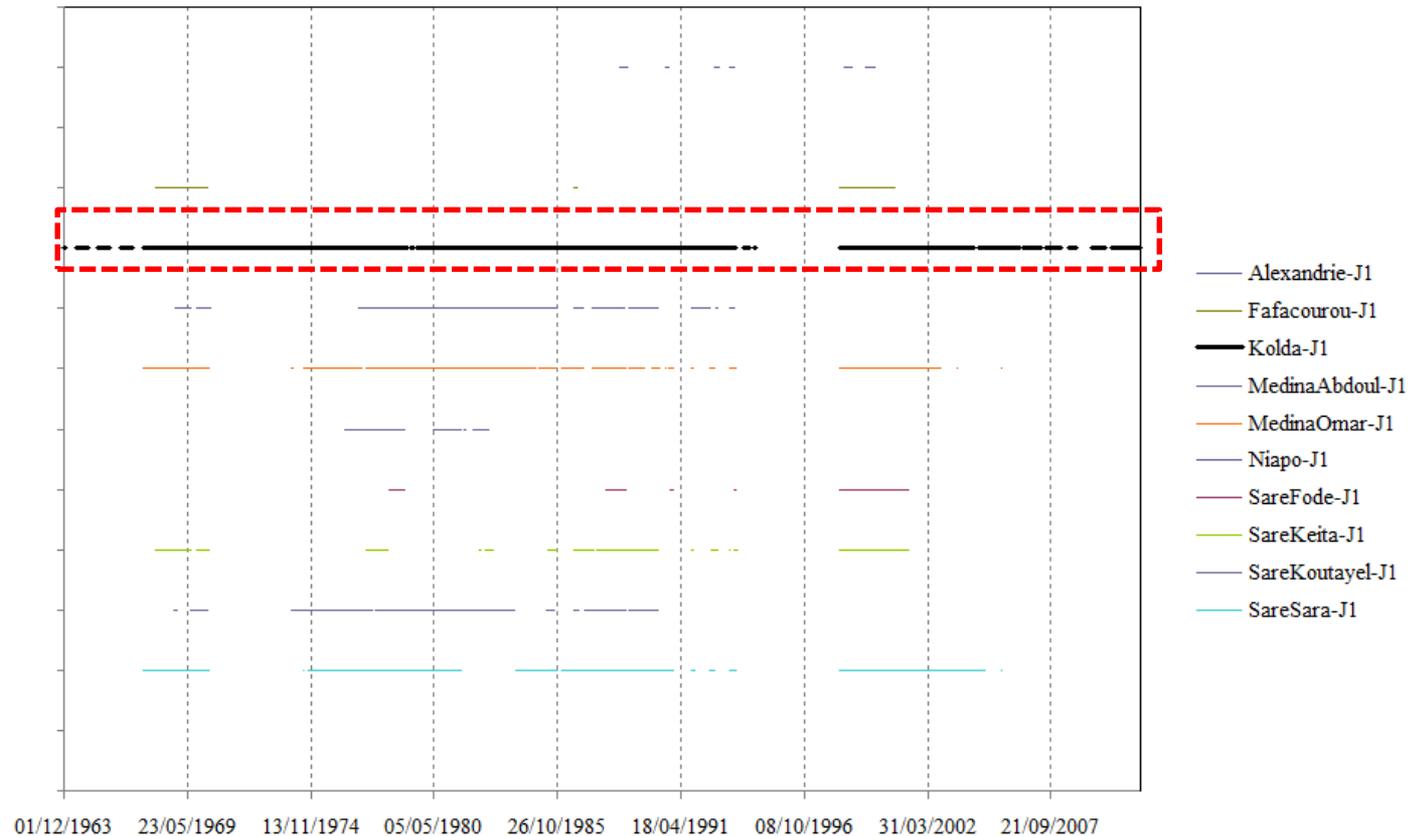
$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U^2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.31 U^2)}$$



ETP de Kolda utilisée car des études (Ardoin-Bardin *et al.*, 2001; Oudin, 2004; Sighomnou *et al.*, 2005; Paturel, 2006) ont montré la faible sensibilité du modèle retenu aux variations d'ETP

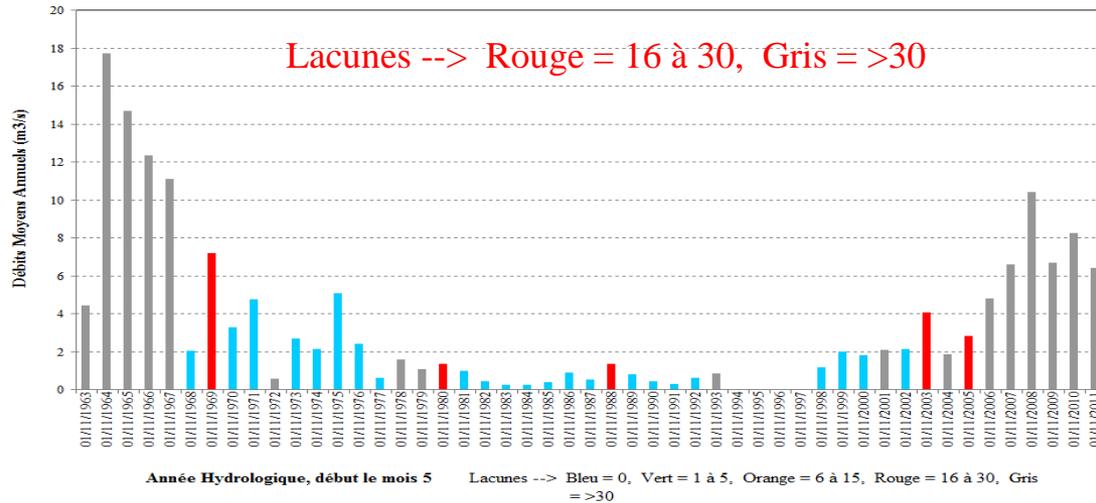
# Données hydrométriques

- 10 stations hydrométriques dans le bassin de la Casamanc
- Données très lacunaires (difficile de faire des études hydrologiques fiables)
- La stations de Kolda contrôle les apports à la basse vallée.

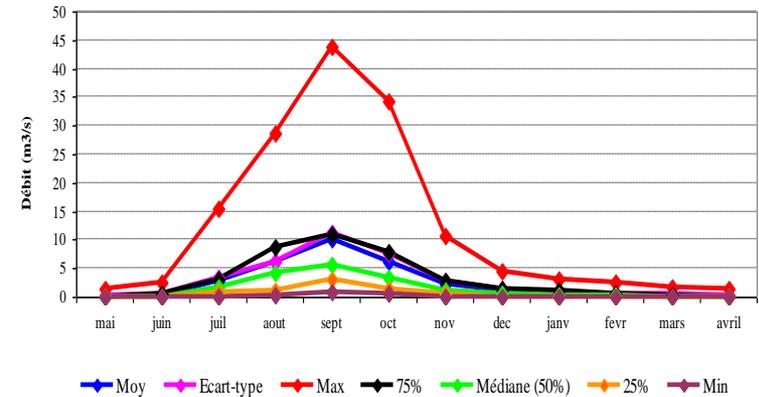


Chronogramme des données hydrologique disponible de la Brigade de Kolda (Débits)

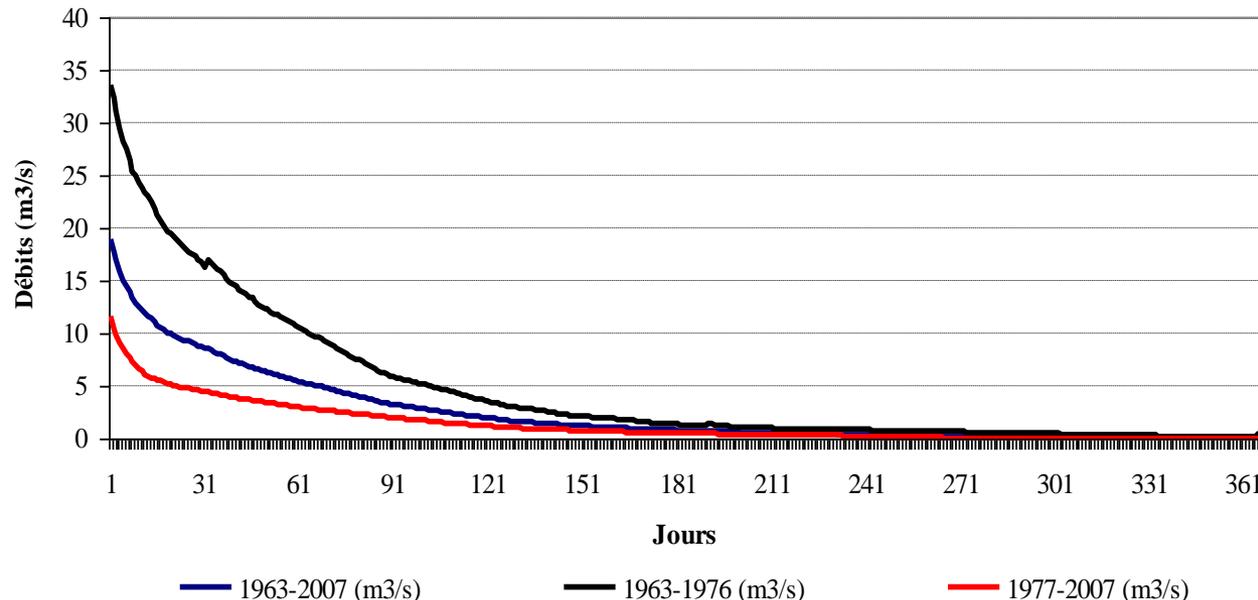
# Données hydrométriques (suite)



Débits annuels de la Casamance à Kolda (1963-2011)



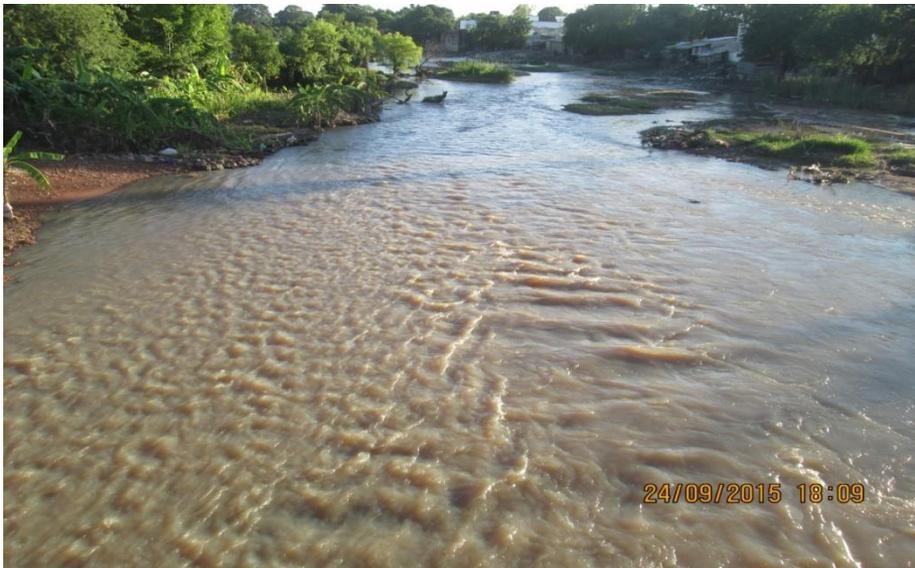
Cycle saisonnier des écoulements de la Casamance à Kolda (1963-2007)



## Débits caractéristiques :

- ✓ l'écoulement supérieur à 5 m<sup>3</sup>/s ne dépasse pas 4 mois sur la période d'étude 1964-2007;
- ✓ sur la période sèche actuelle (1977-2007), l'écoulement supérieur à 5 m<sup>3</sup>/s ne dépasse pas 1 mois;
- ✓ Débit de la Casamance à Kolda très faibles.

# Données hydrométriques



Quelques illustrations de la Casamance à Kolda en période d'étiage (images du 03/06/2015) et en période de crue

# Modèles climatiques

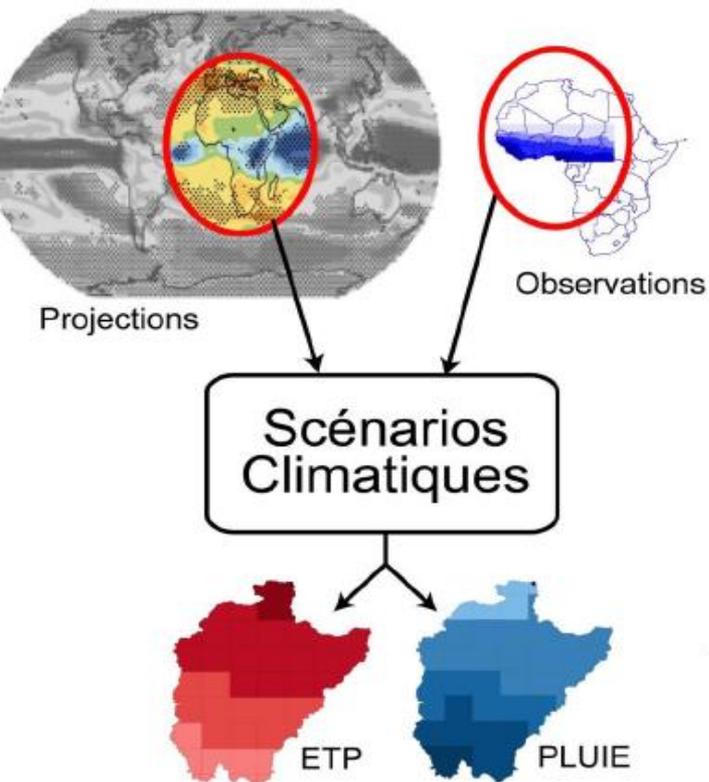
Plusieurs modèles de nos jours : raison de disponibilité des données et utilisation fréquente de ces modèles dans les études d'impacts – **5 Modèles globaux – 2 scénarios (RCP 4.5 et RCP 8.5)**

Centre de modélisation	Nom abrégé du modèle	Résolution (lat x long)
Canadian Center for Climate Modelling and Analysis CCCMA	CanESM2	0.25° × 0.25°
Irish Centre for High-End Computing	ICHEC	0.5° × 0.5°
Met Office Hadley Centre - MOHC	HadGEM2-ES	0°25' × 0°25'
Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	MIROC5	0°25' × 0°25'
CNRM-CM5 ESM developed at Météo-France and CERFACS <a href="http://www.cnrm.meteo.fr/cmip5/IMG/pdf/Voldoire_et_al_CD_online.pdf">http://www.cnrm.meteo.fr/cmip5/IMG/pdf/Voldoire_et_al_CD_online.pdf</a>	CNRM CERFACS	0°25' × 0°25'

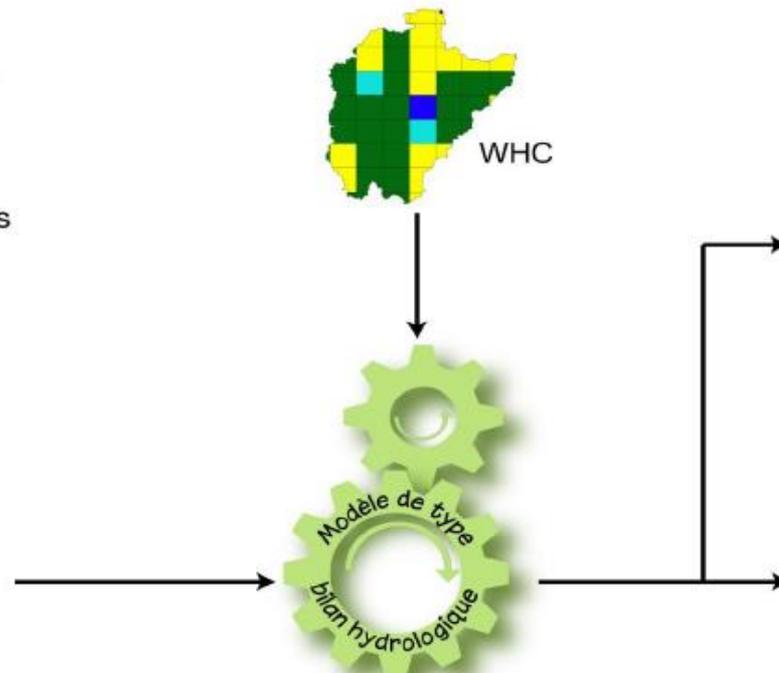
# Prévision des écoulements futurs

## Méthodologie intégrée

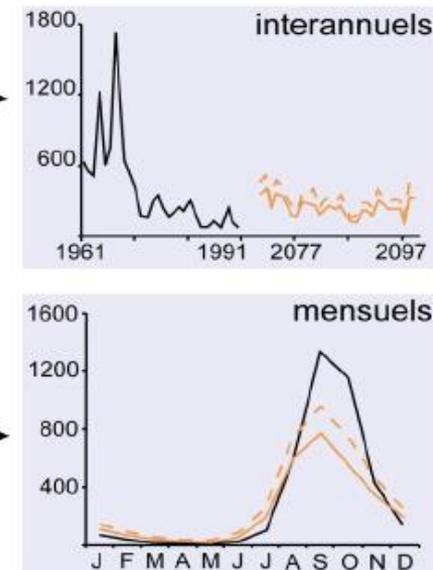
ETAPE 1 :  
Construction de  
scénarios climatiques



ETAPE 2 :  
Mise en oeuvre du  
modèle hydrologique

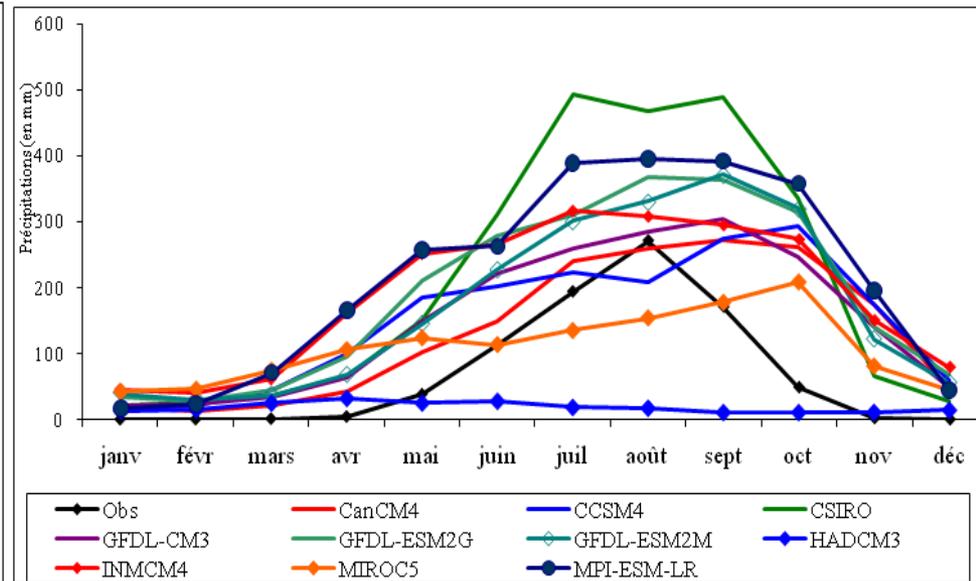
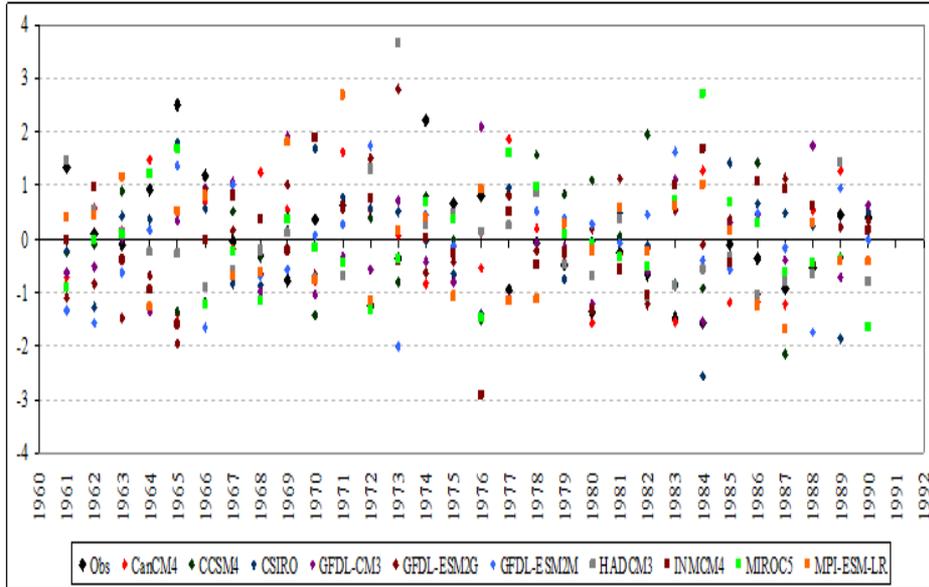


ETAPE 3 :  
Simulations des  
écoulements



# Prévision des écoulements futurs

## Projections climatiques: quelle fiabilité des sorties des GCM?



Bassin de la Falémé (fleuve Sénégal) : Comparaison données Stations & données modèles climatiques (*annuelle et mensuelle*) sur la période 1961-1990 (Source : Faty, 2014)

- Relative bonne représentation de la dynamique saisonnière
- Mauvaise estimation des volumes précipités
- GCM ne sont pas aptes à reproduire correctement les précipitations (volumes et variabilité) : aux échelles locales et régionales, aux pas de temps saisonnier et interannuel

# Prévision des écoulements futurs

Correction biais des sorties des GCM (pluie et Température) basé sur la comparaison des simulations du modèle climatique entre la période de référence (1983-2007) et la période future (2016-2040)

Méthode des deltas (Ardoin-Bardin *et al.*, 2009)

**Pluie** { 
$$P^{SCEN} = P^{OBS} * (1 + \Delta P) \quad \text{avec} \quad \Delta P(\%) = \frac{\bar{P}_{horiz}^{GCM} - \bar{P}_{ref}^{GCM}}{\bar{P}_{horiz}^{GCM}} * 100$$

**Température** { 
$$Y_{1971, \dots, Y_{2000}}$$
  
$$\Delta Y = \bar{Y}_{GCM:future} - \bar{Y}_{GCM:reference}$$
  
$$\text{Scenario} = Y_{1971} + \Delta Y, \dots, Y_{2000} + \Delta Y$$

- ETP futures calculée à partir des projections de température en utilisant la formule de [Oudin et al., 2005](#)
- [Fabre et al., 2015](#) ont montré que cette méthode sous estime l'ETP

• cette méthode a permis d'élaborer des scénarios plus réaliste de précipitation et d'ETP qui seront utilisés en entrée du modèle hydrologique GR2M

# Prévision des écoulements futurs

---

Détermination des paramètres qui régissent la relation pluie-débit pour la simulation des écoulement futurs

- ❑ Calage-Validation de GR2M (**X1 et X2**) avec données observées
- ❑ Simulation des écoulements futurs avec les paramètres **X1 et X2** choisis

# Calage des paramètres du modèle (X1 et X2)

## GR2M- Calage

- Pour le calage du modèle il faut définir:

- Un critère de calage
- Une méthodologie de calage

- Quatre critères basés sur un écart entre les valeurs observées et les valeurs calculées par le modèle:

$$Nash(Q) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{cal,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2}$$

la somme des erreurs quadratiques

$$Nash(\sqrt{Q}) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_{obs,i}} - \sqrt{Q_{cal,i}})^2}{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_{obs,i}} - \sqrt{\bar{Q}_{obs}})^2}$$

prend en compte les débits de crues et d'étiages

$$Nash(\ln Q) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\ln(Q_{obs,i} + \varepsilon) - \ln(Q_{calc,i} + \varepsilon))^2}{\sum_{i=1}^n (\ln(Q_{obs,i} + \varepsilon) - \ln(\bar{Q}_{obs} + \varepsilon))^2}$$

donne l'importance aux étiages

$$Bilan = 1 - \left| \frac{\sum_{i=1}^n Q_{calc,i}}{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}} - \frac{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}}{\sum_{i=1}^n Q_{calc,i}} \right|$$

un critère d'appréciation du bilan volumique

Méthodologie de calage

- optimisation numérique de s critères

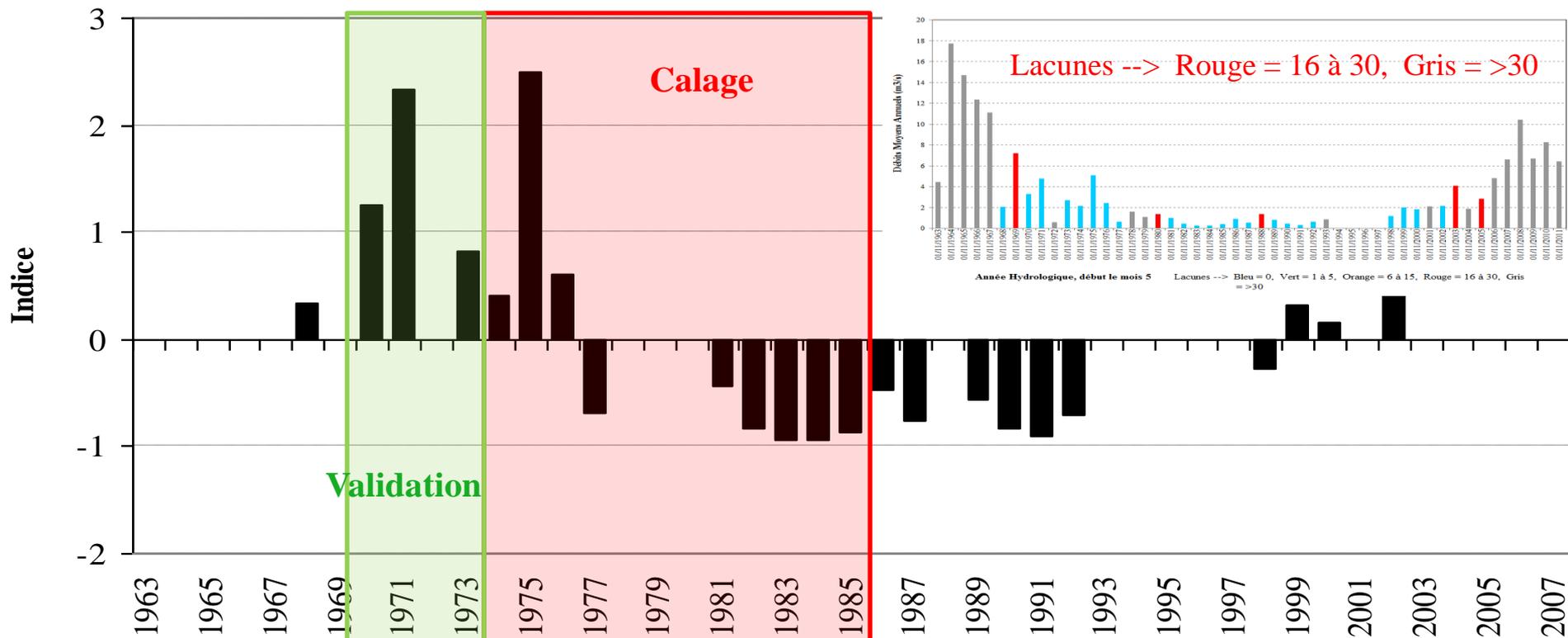
# Calage/validation du modèle (choix des périodes)

## GR2M-Calage / Validation

Difficile d'avoir des séries continues sans lacune pour le calage et la validation croisée du modèle

Calage : 1974-1985

Validation : 1968-1973



# Mise en œuvre du modèle GR2M

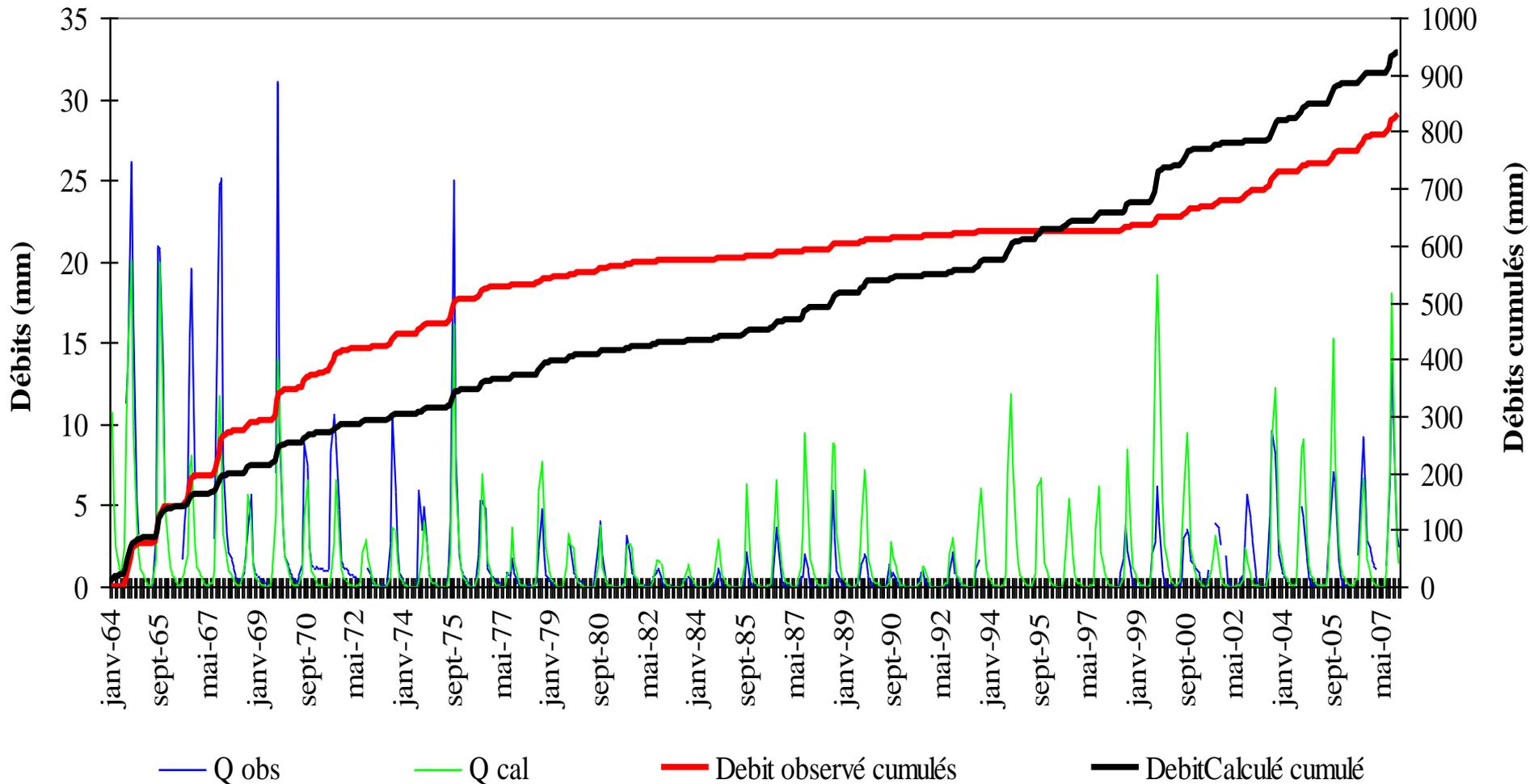
## Mise en œuvre GR2M – Résultats Calage-Validation

	Critères d'efficacité (%)				Paramètres	
	$Nash(Q)$	$Nash(\sqrt{Q})$	$Nash(\ln Q)$	Bilan	X1	X2
Calage (1974-1985)	89.6	87.8	86.3	113.3	<b>8.01</b>	<b>0.43</b>
Validation (1968-1973)	67.3	57.2	8	67.8		

Paramètres (X1 et X2) utilisés pour la simulation des débits futurs

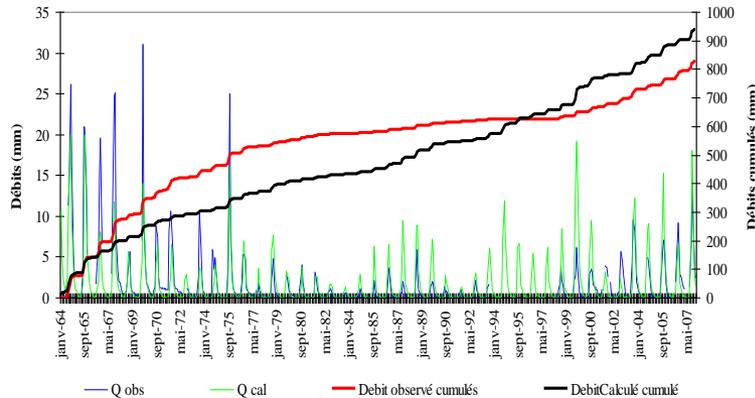
# Mise en œuvre du modèle GR2M

Mise en œuvre GR2M – Résultats des simulations sur la période 1964-2007

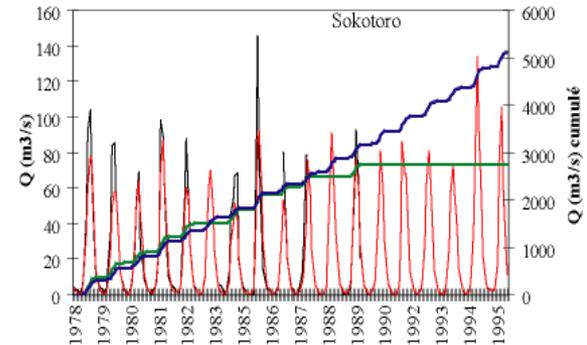
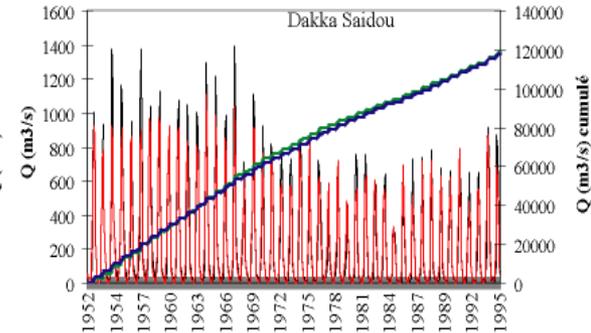
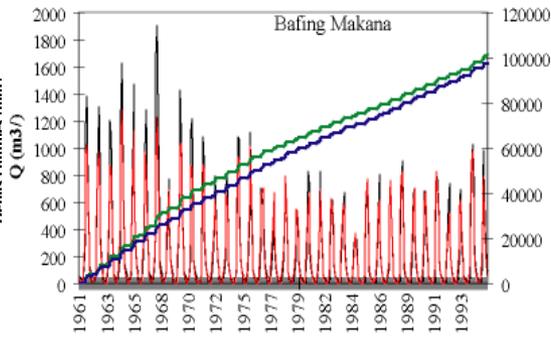


# Mise en œuvre du modèle GR2M

Mise en œuvre GR2M – Comparaison des simulations de la Casamance avec d'autres bassins versants



Performance de GR2M à Kolda (Casamance)



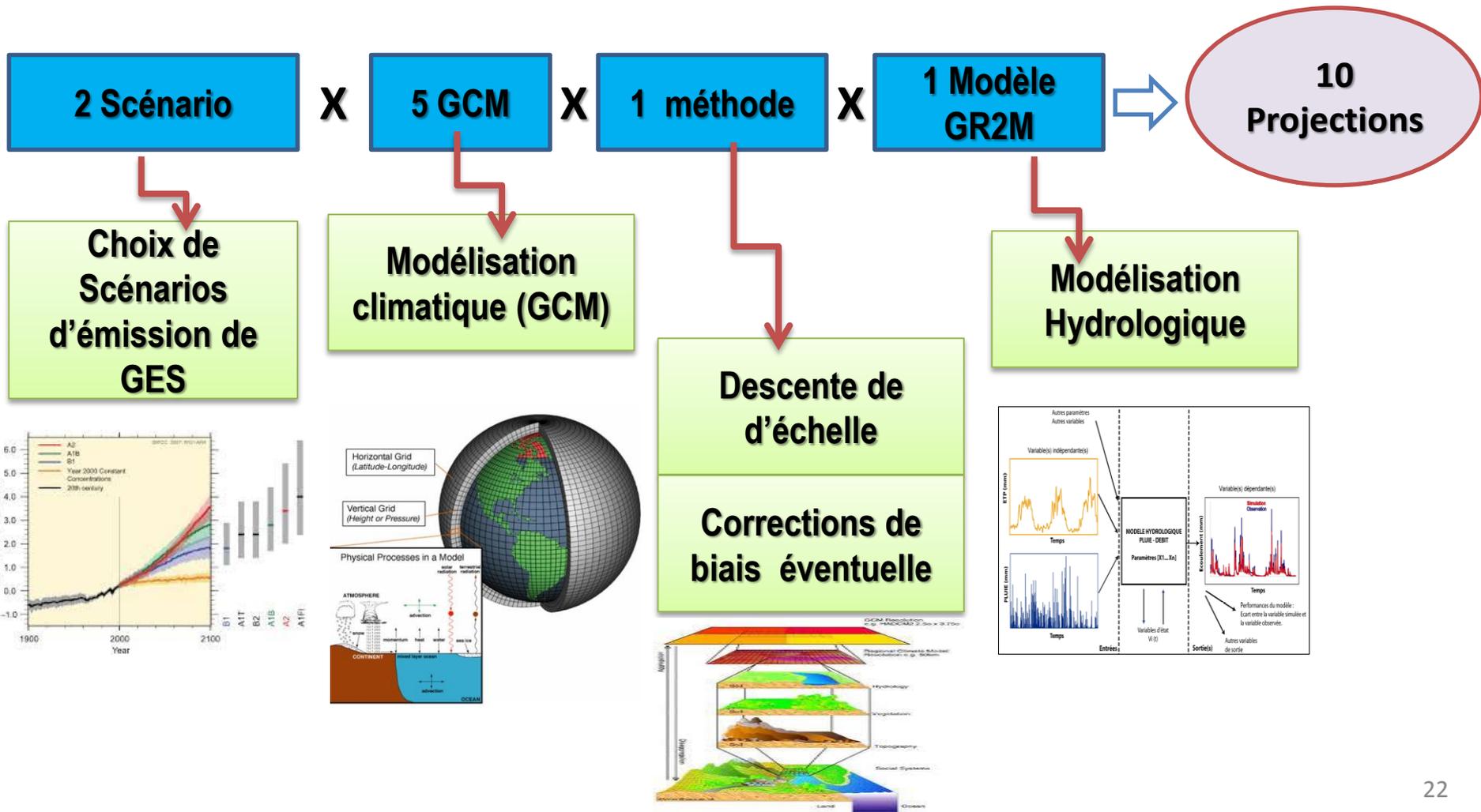
Performance de GR2M à Bafing Makana, Dakka Saidou et Sokotoro (fleuve Sénégal) (Source : Bodian et al., 2012 et 2015)

✓ GR2M plus robustes pour la simulation des débits du Bafing (fleuve Sénégal) que les écoulements de la Casamance ;  
✓ Explication possible: faiblesse des débits de la Casamance.

- Paramètres (X1 et X2) utilisés pour faire des projections sur les écoulements;
- hypothèse que la relation pluie-débit qu'ils régissent restera inchangé dans le futur;

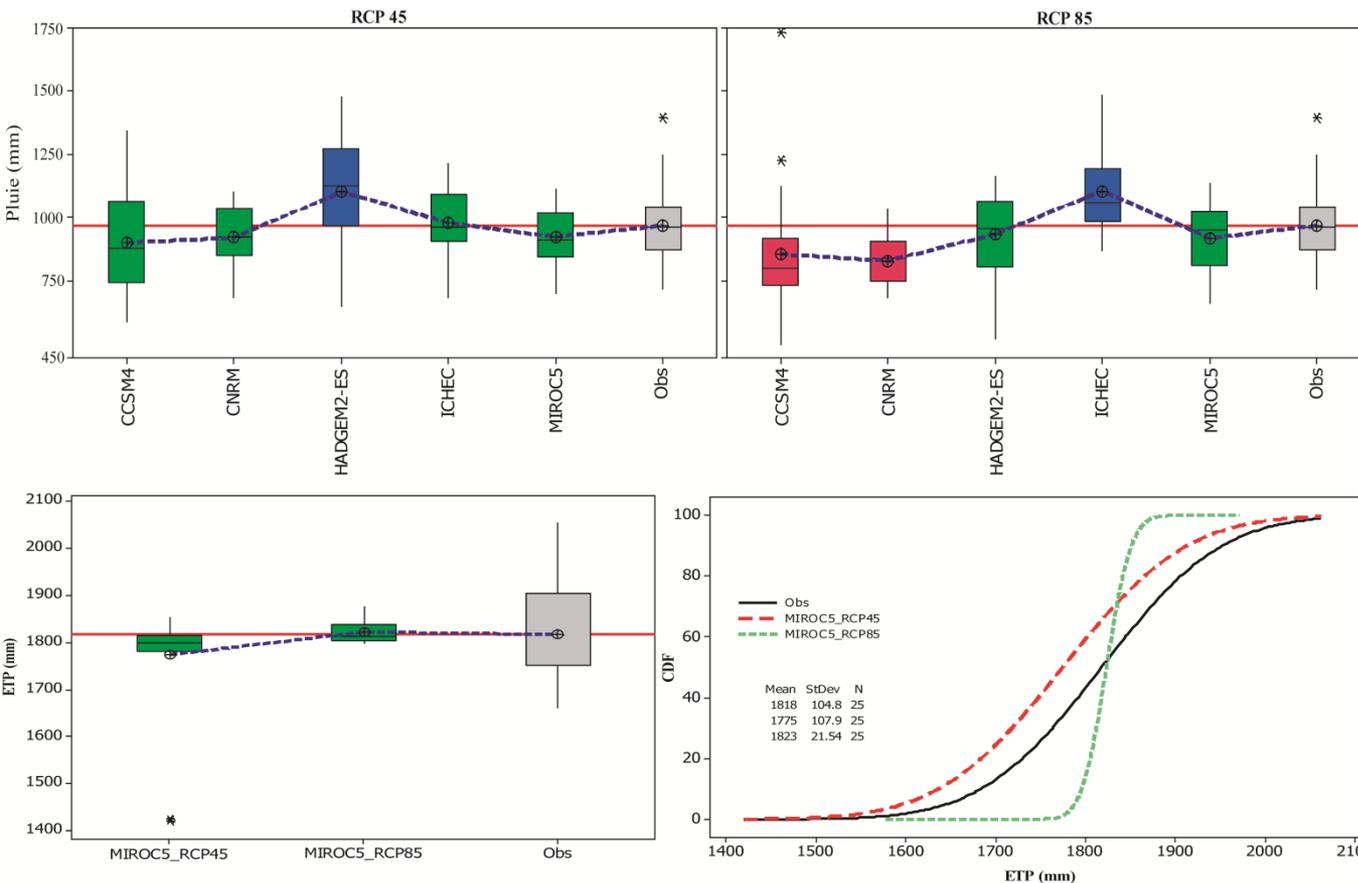
# Prévision des écoulements futurs

## Synthèse de la méthodologie



# Prévision des écoulements futurs

Forçages climatiques: Quelle tendance par rapport à la période de référence 1983-2007?



- Baisse
- Pas de tendance nette
- Augmentation

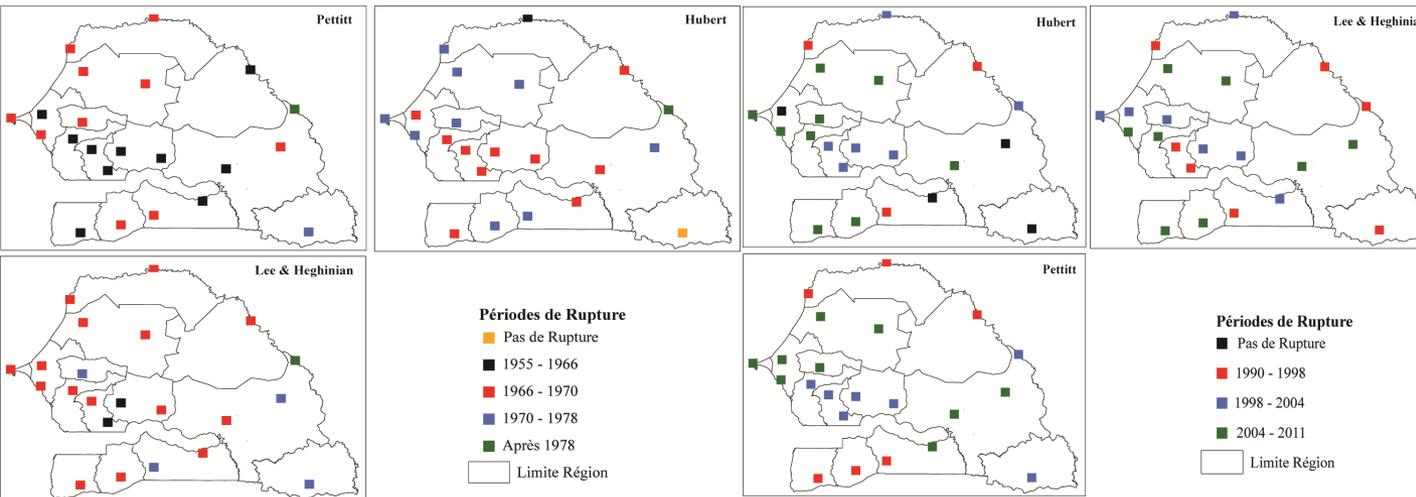
Pour les précipitations, **les projections sont plus incertaines et il n'y a pas de concordance entre les 10 scénarios considérés**. Cependant, la moyenne des modèles annonce, des changements de précipitation à l'horizon 2028 à peine perceptible **de -0.36% pour le RCP 4.5 et de -4.16% pour le RCP 8.5**.

**L'augmentation des températures ne sait pas accompagnée par une augmentation de l'ETP**. Résultats similaire trouvé par Paturel (2014) sur le bassin du Bani (affluent du Niger)

Evolution des forçages climatiques à l'horizon 2028 (2016-2040) par rapport à la période de référence 1983-2007

# Prévision des écoulements futurs

Projections de pluies : y a-t-il un accord avec la tendance actuel des pluies observées au Sénégal?

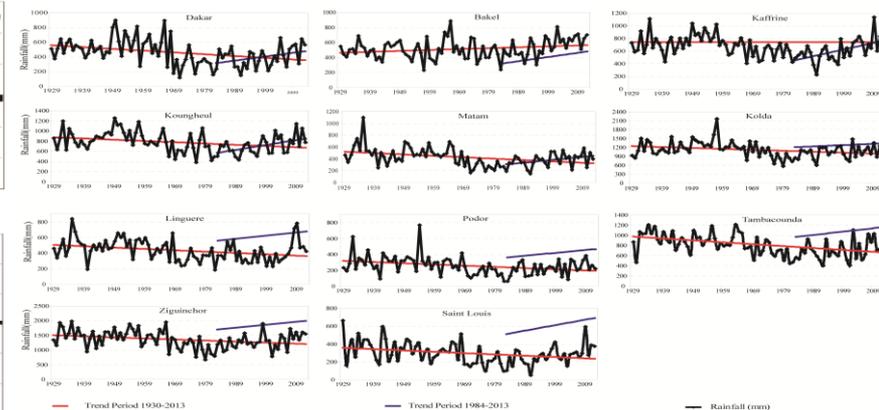
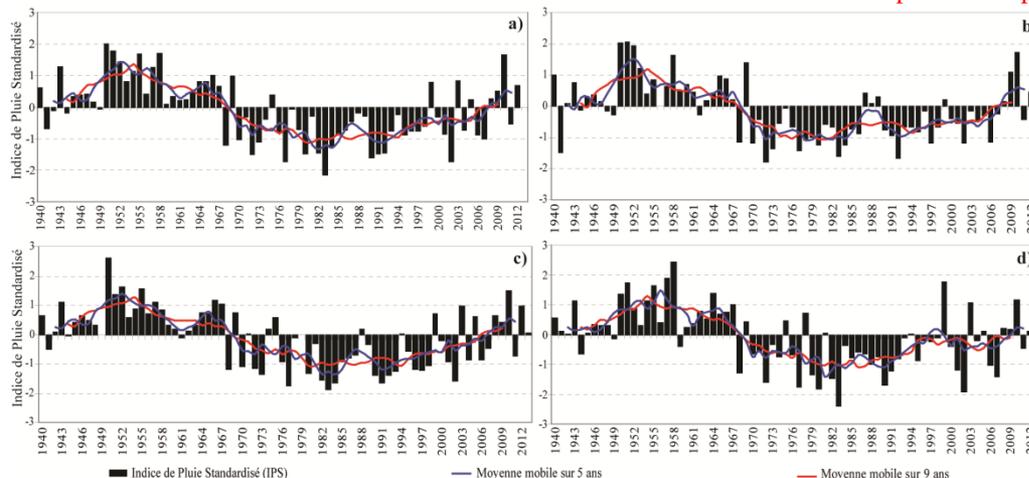


Pour l'ensemble du Sénégal, cette seconde rupture se situe en 1997 (test de PETTITT) ou en 2007 (test de LEE et HEGHINIAN ; méthode de HUBERT). Cependant, même si l'on identifie ainsi une discontinuité vers des conditions plus humides, les précipitations annuelles restent inférieures (de 4,4 % pour l'ensemble du Sénégal) à celles d'avant 1968 ou 1970.

Date de rupture dans les séries pluviométriques de la période 1940-2013 (source : Bodian, 2014)

Date de rupture dans les séries pluviométriques de la sous-série allant de la première rupture à 2013 (source : Bodian, 2014)

Time series and linear trend of annual rainfall at chosen stations (source : Diop et al., 2016)

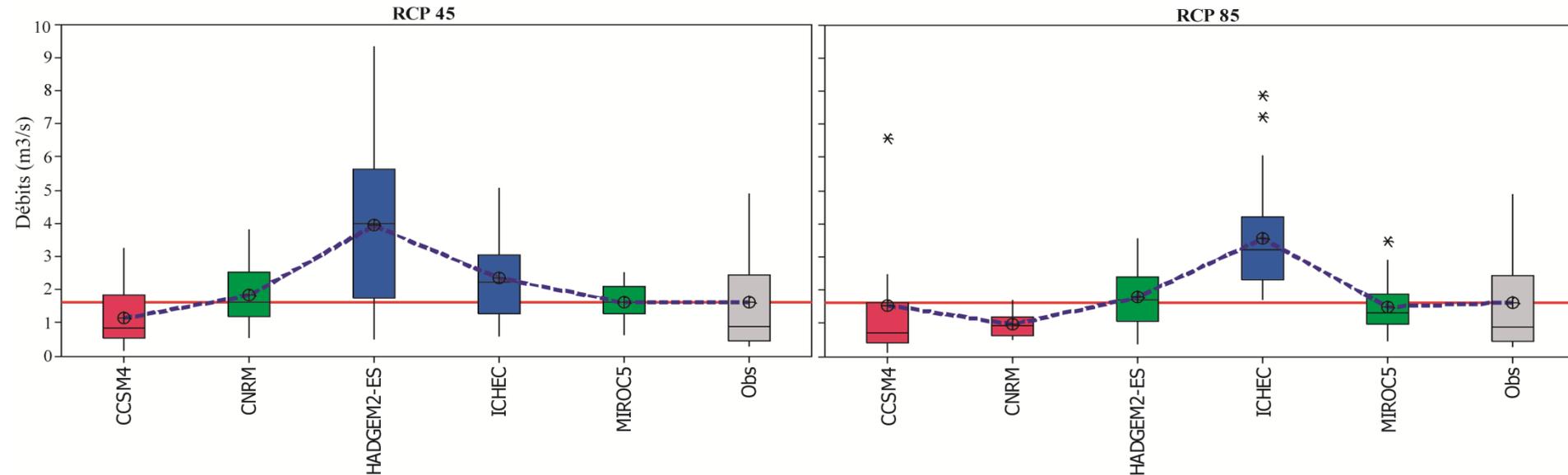


- pour les projections climatiques diminution des pluie
- tendance actuelle : reprise de la pluviométrie avec une forte variabilité

Variation temporelle des indices de pluie standardisée au Sénégal (source : Bodian, 2014)

# Prévision des écoulements futurs

## Écoulements futurs: Quelle tendance?



Evolution des écoulements de la Casamance à l'horizon 2028 (2016-2040) par rapport à la période de référence 1983-2007 : la ligne rouge représente la moyenne des valeurs observées sur la période de référence 1983-2007.

■ Baisse

■ Pas de tendance nette

■ Augmentation

- En hypothèse moyenne (scénario RCP 4.5), la moyenne calculée à partir des simulations des cinq modèles climatiques donne une augmentation des écoulements de 31 %.
- En hypothèse pessimiste (scénario RCP 8.5), la moyenne de l'ensemble des simulations produit une augmentation de 12,5 % des écoulements moyens annuels

# Conclusions

De manière globale, en hypothèse moyenne (**scénario RCP 4.5**), la moyenne des cinq modèles climatiques donne une augmentation des écoulements de **31 %**. Pour le scénario **RCP 8.5**, la moyenne de l'ensemble des simulations produit une augmentation de **12,5 %** des écoulements moyens annuels.

Cette augmentation des écoulements (par conséquent des disponibilités en eau) dans le bassin de la Casamance est en accord avec la tendance actuelle des pluies à l'échelle du Sénégal.

Les résultats obtenus doivent être maniés avec beaucoup de précaution en raison de quelques difficultés inhérentes aussi bien à la modélisation hydrologique qu'à l'incertitude issue des modèles climatiques.

Les incertitudes ne doivent pas empêcher l'action



Source : Union of Concerned Scientists



# MERCI DE VOTRE AIMABLE ATTENTION!!!

[ansoumana.bodian@ugb.edu.sn](mailto:ansoumana.bodian@ugb.edu.sn)  
[bodianansoumana@gmail.com](mailto:bodianansoumana@gmail.com)



Programme d'Appui  
au Programme National d'Investissement  
dans l'Agriculture au Sénégal

