

# Étude de la relation eaux de surface-eaux souterraines dans un contexte de changements climatiques dans la zone Sud du bassin du Saloum (Sénégal)

Apport des outils géochimiques, isotopiques, de la  
télédétection, des SIG et de la modélisation

Défense de thèse par

**Ndeye Maguette DIENG NDAO**

Promoteur Nord : **Prof Alain DASSARGUES** (ULg)

Promoteur Sud : **Prof Serigne FAYE** (UCAD)

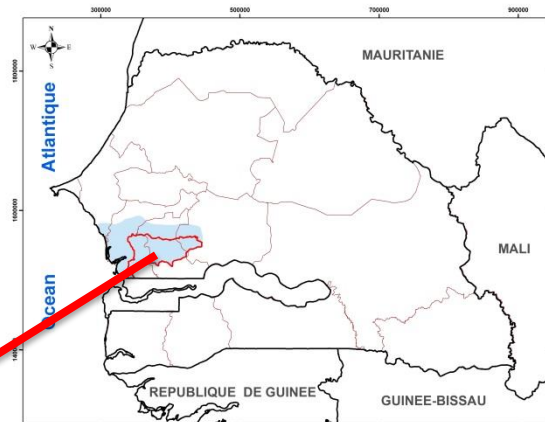
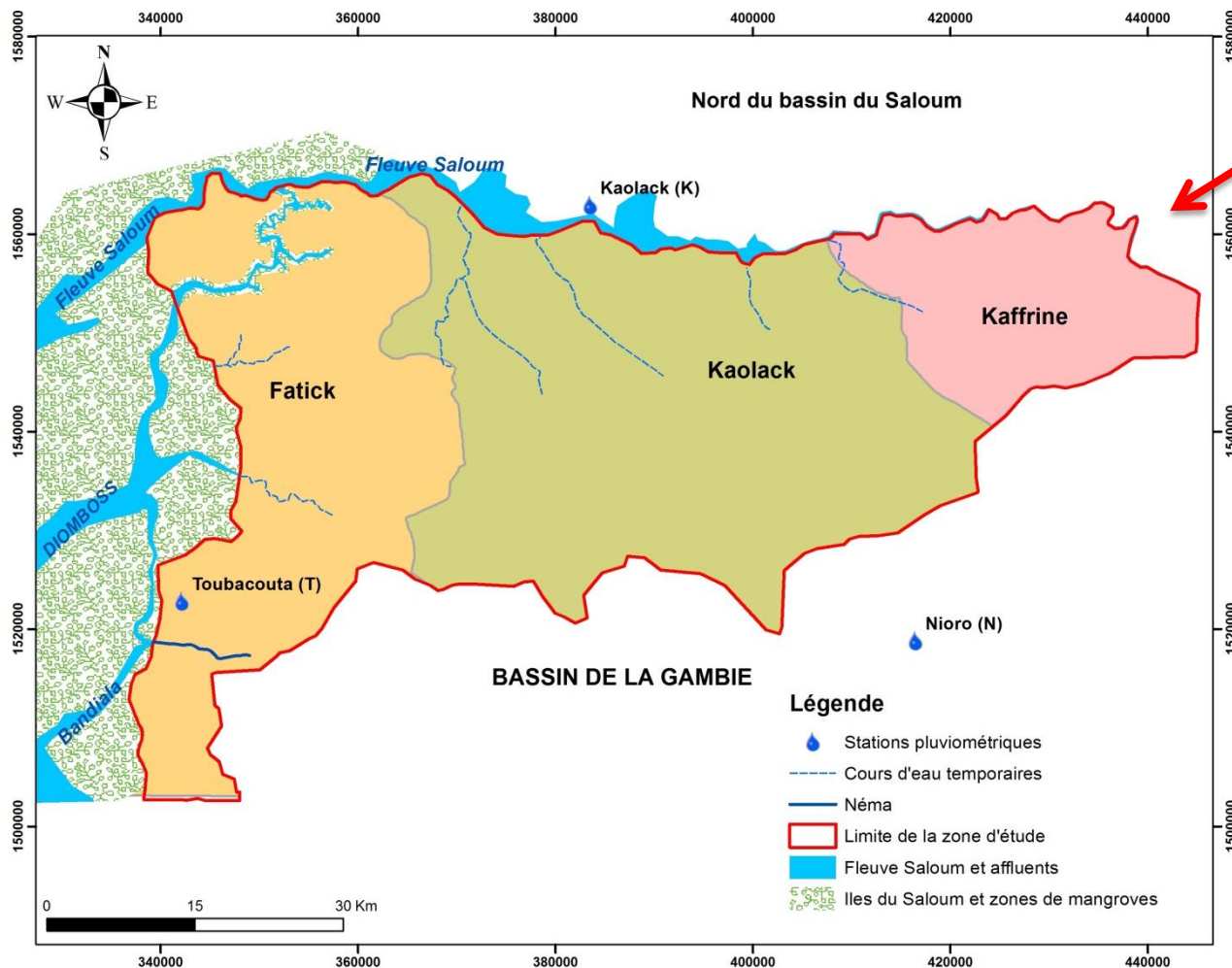
Liège, le 24 Octobre 2017

# Constat de départ : Situation et importance des eaux souterraines

## Localisation

Sud du bassin du Saloum (Régions Fatick, Kaolack et Kaffrine)

Centre-Ouest du Sénégal (3400 km<sup>2</sup>)



## Ressources en eau

- Cours d'eau temporaires (saison pluvieuse)
- Cours d'eau pérennes mais salés
- Nappe profonde du Maastrichtien salée et fluorée (Fluorose dentaire et osseuse)

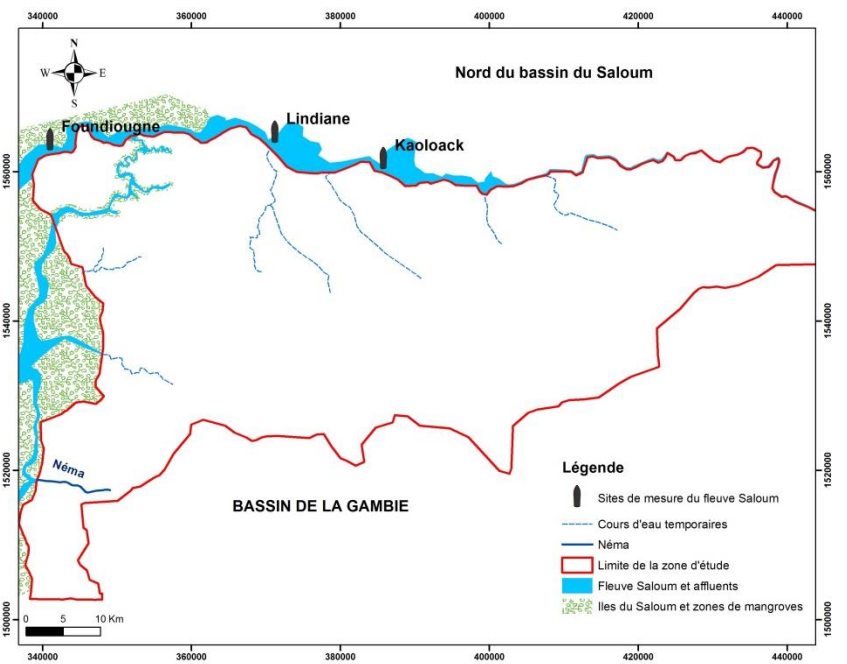
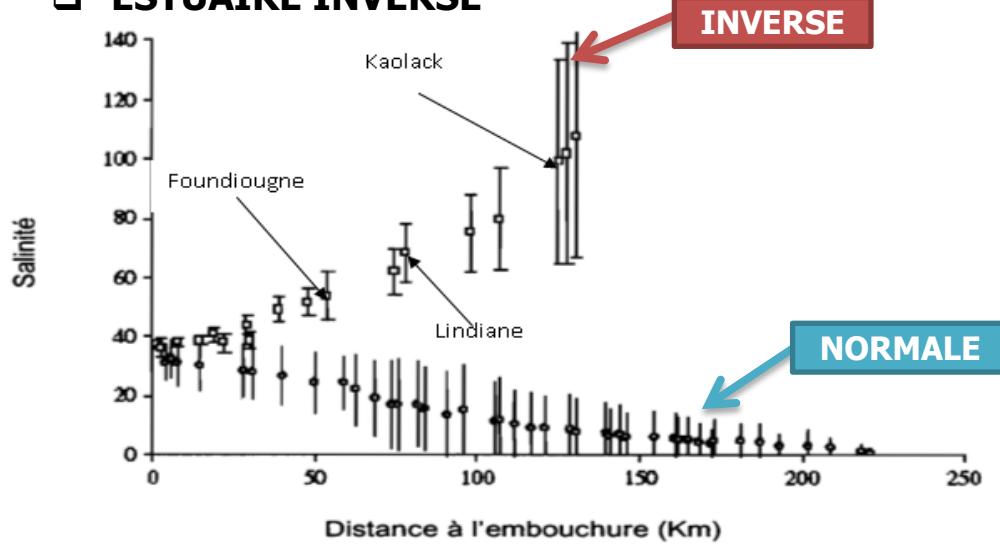
**Nappe du Continental Terminal (CT)**  
(aquifère superficiel)



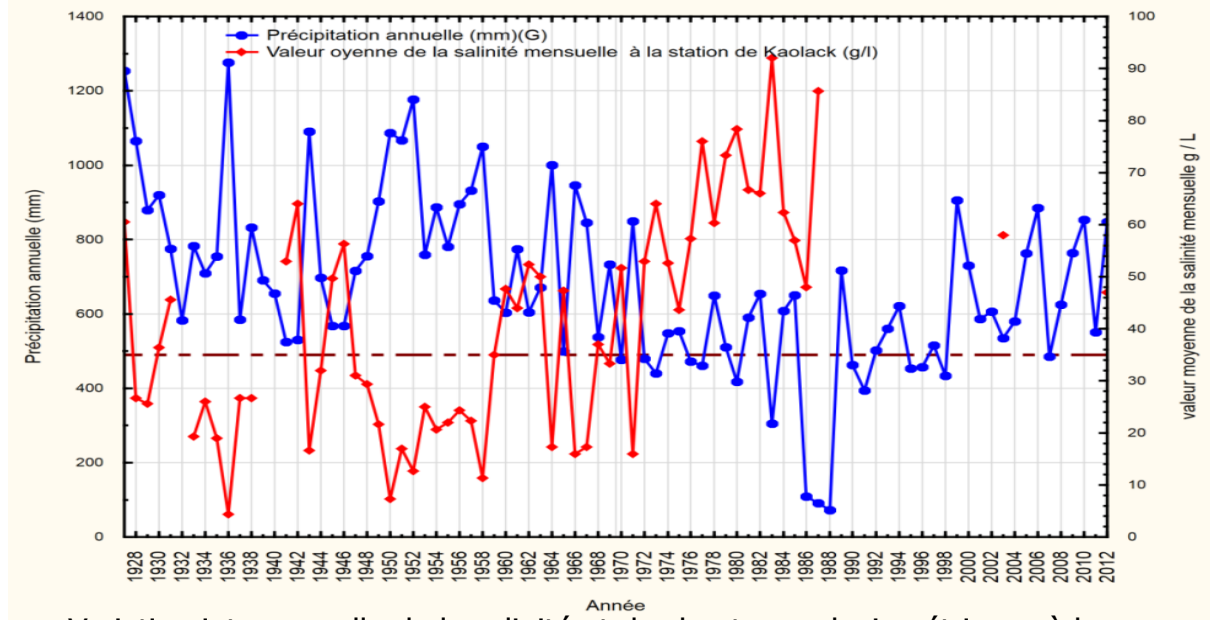
**AEP**

# Constat de départ : Problématique

## ESTUAIRE INVERSE



Gradient de salinité (g/l) le long des estuaires du Sine Saloum (□ Inverse) et de la Gambie (o Normale) (Panfili et al., 2006)



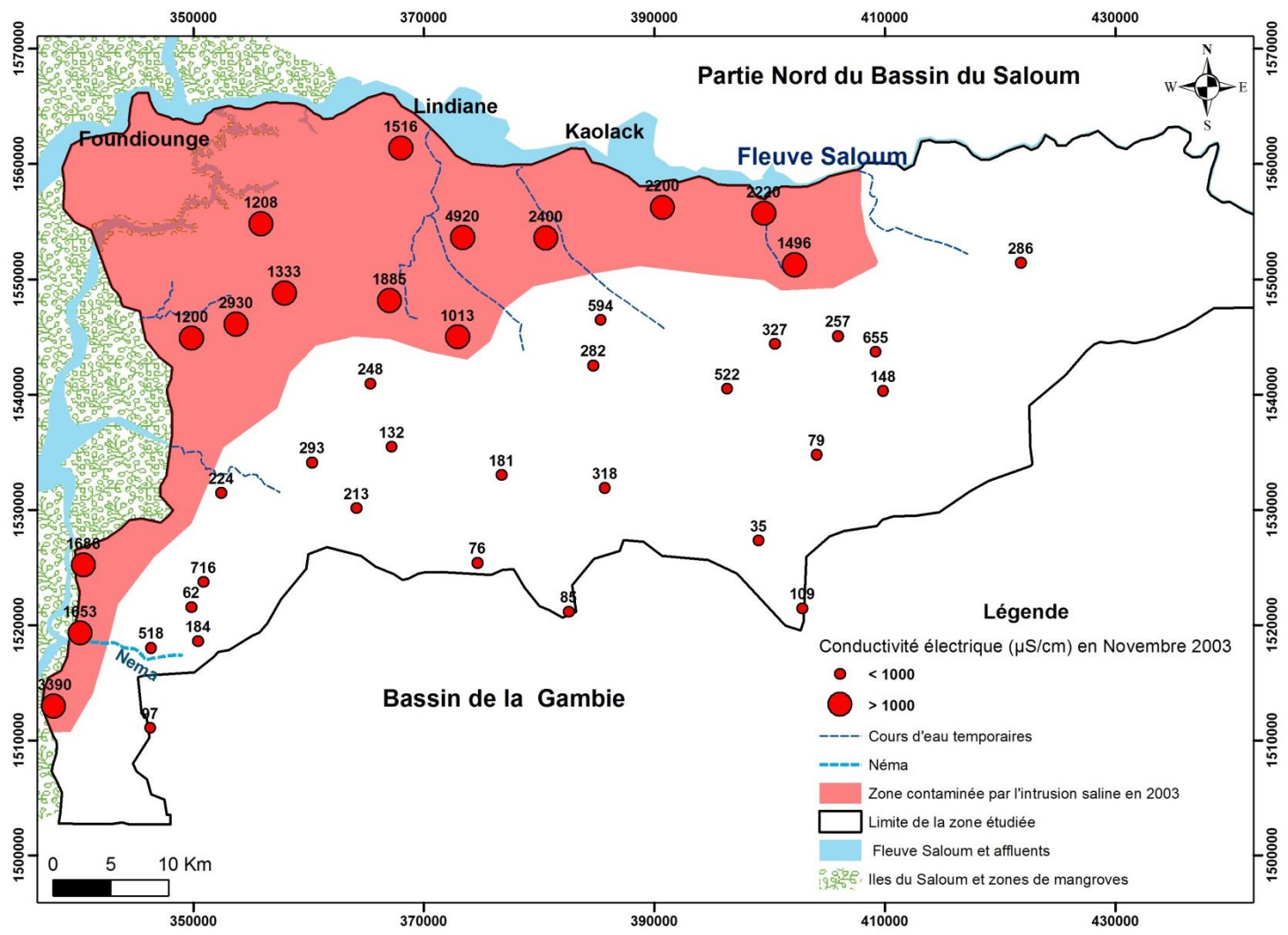
Variation interannuelle de la salinité et des hauteurs pluviométriques à la station de Kaolack entre 1927 et 2012

# Constat de départ : Problématique

## ❑ **PRESSION QUALITATIVE** Contamination par les eaux salées (fluviales et marines)



**Dégradation de ces eaux**



## ❑ **PRESSION QUANTITATIVE**

Demande croissante (interne)  
Transferts prévus (autres localités)

Distribution des valeurs de conductivité électrique ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) dans les eaux de la nappe du CT en Novembre 2003 (Faye, 2005)

### **Comprendre les interactions eaux de surface – eaux souterraines dans ce contexte de salinisation de l'estuaire du Saloum**

- ❑ Réactualiser les connaissances sur le fonctionnement hydrodynamique
- ❑ Caractériser la salinisation de la nappe
- ❑ Élaborer un modèle conceptuel du fonctionnement hydrogéologique de la nappe
- ❑ Simuler les écoulements d'eau pour une étude bilantaire entre la nappe et le fleuve
- ❑ Simuler les réponses du système pour différents scénarios d'exploitation et de changements climatiques

## Bibliographie et synthèse données historiques

Approche cartographique  
(télédétection/SIG)

- Caractérisation des états de surface du système
- Évaluation qualitative de la recharge

Hydrodynamisme

- Géométrie de l'aquifère
- Piézométrie de la nappe

Bilan d'eau et des chlorures

- Estimation fine de la recharge

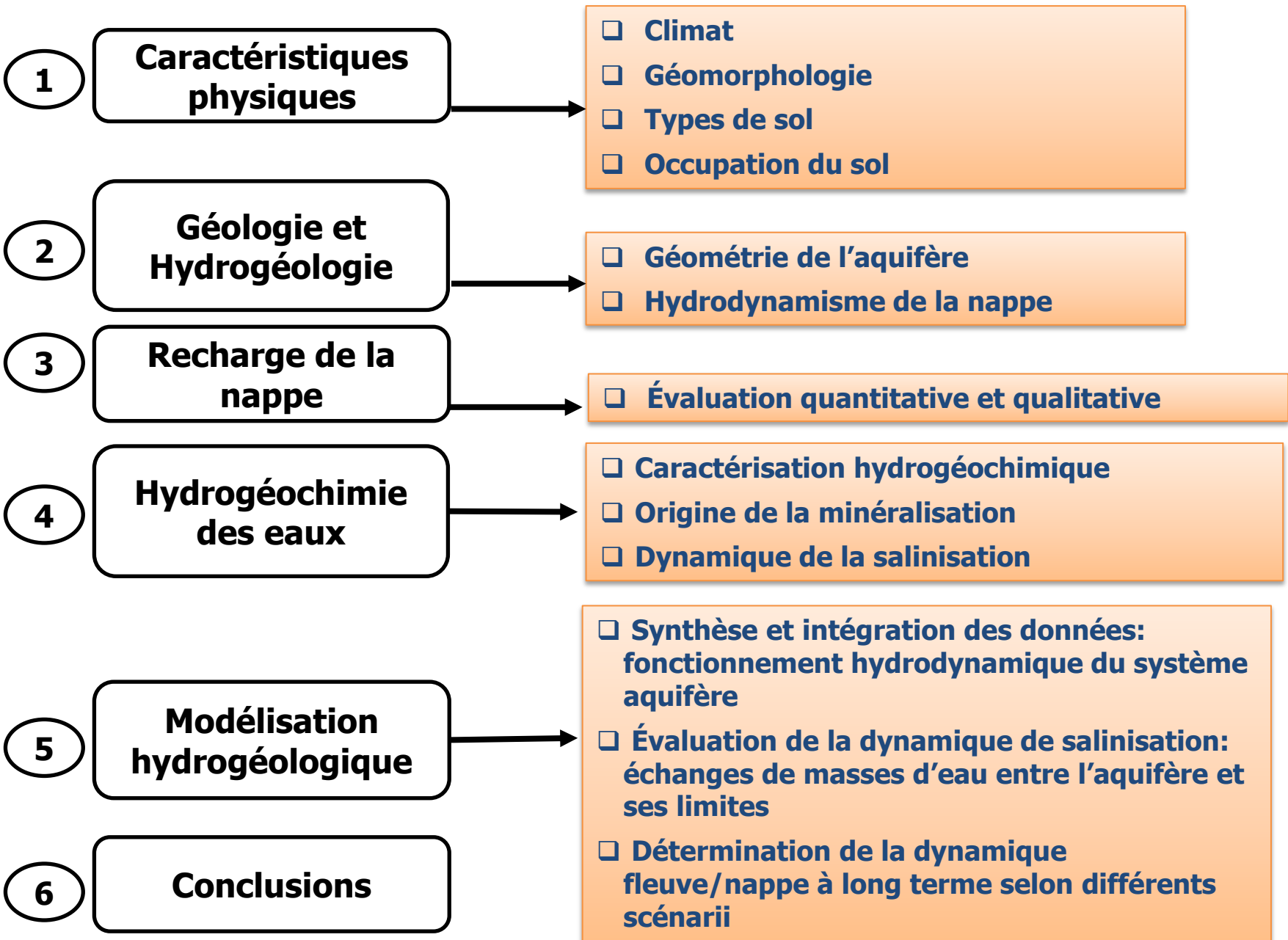
Hydrogéochimie

- Caractérisation hydrogéochimique
- Origine de la minéralisation
- Évolution de la salinisation

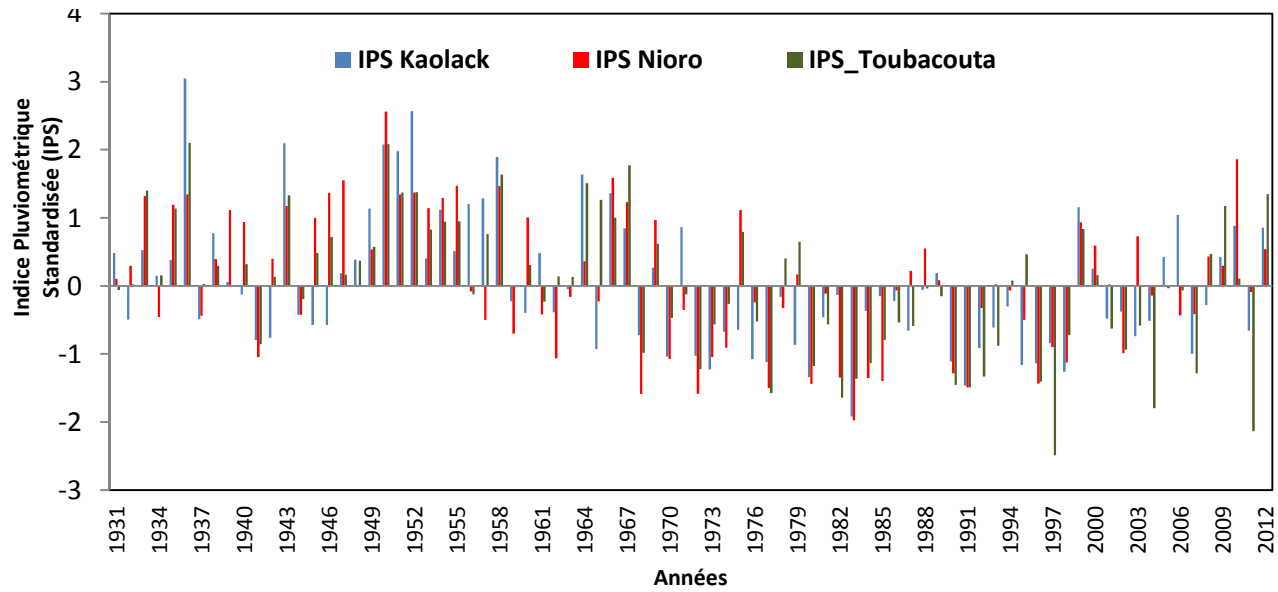
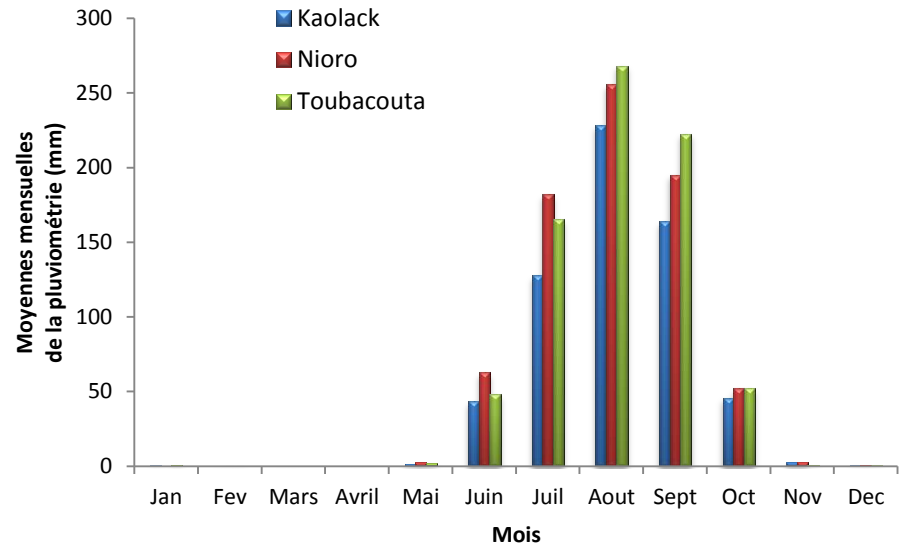
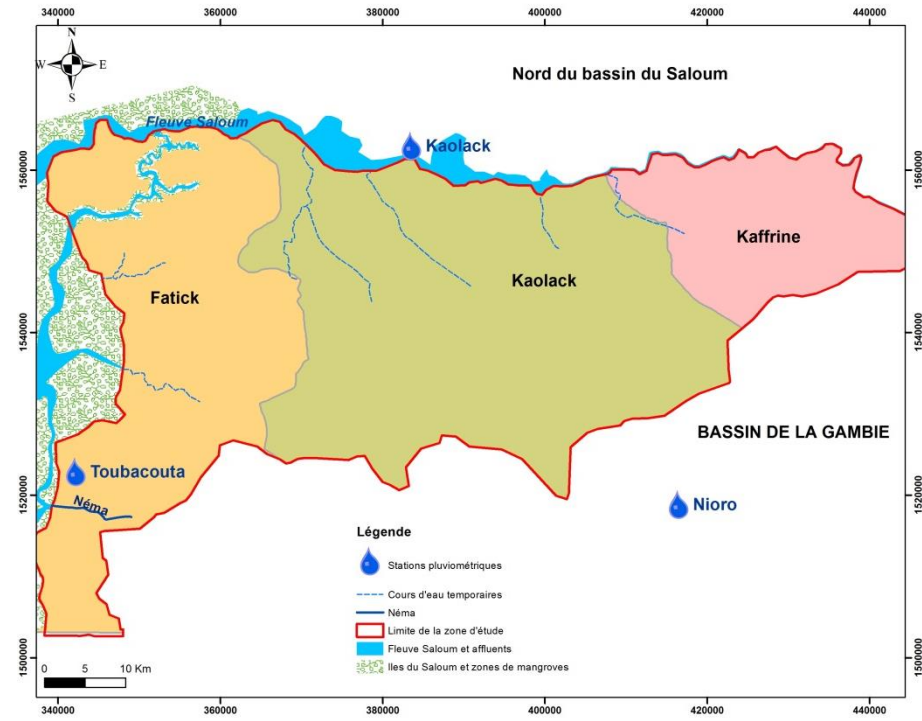
Modèle conceptuel du  
fonctionnement de la  
nappe

Simulations

# Plan de présentation

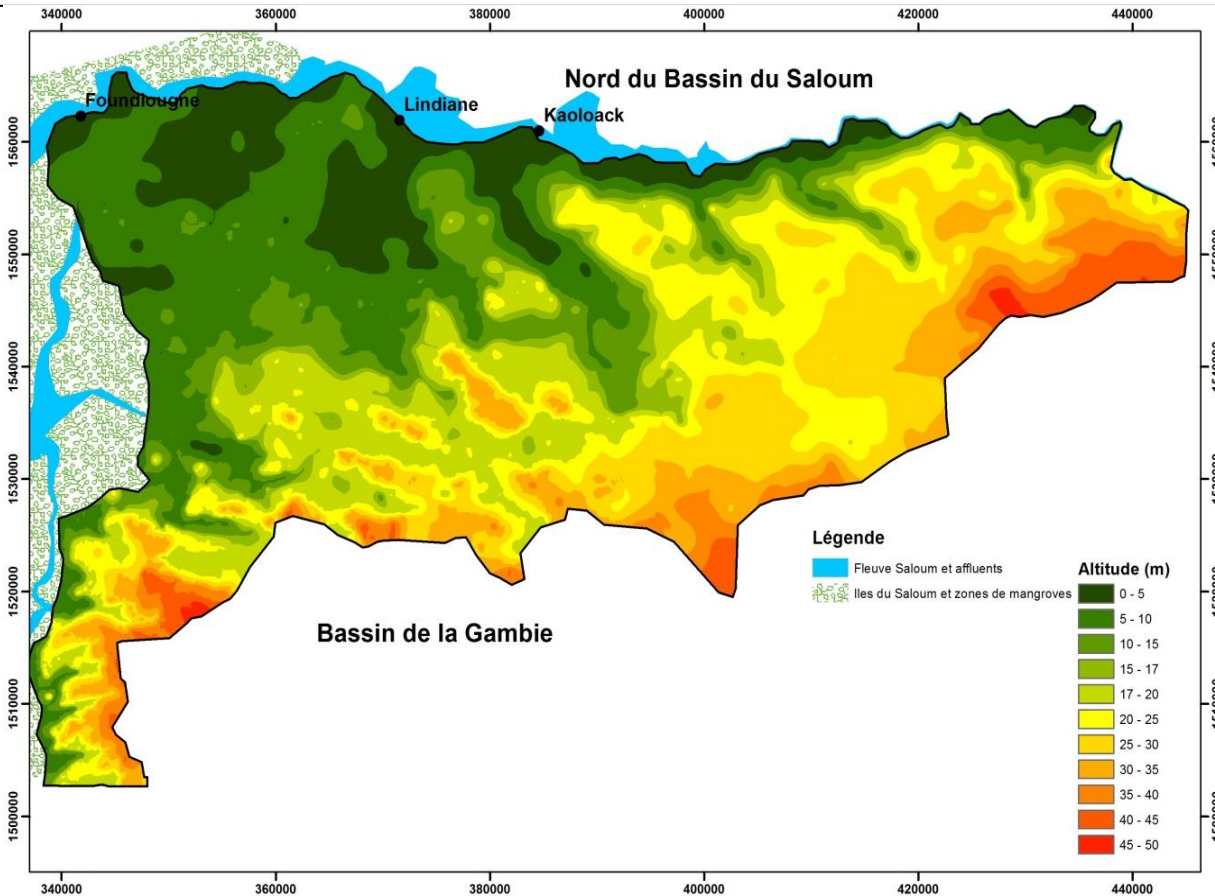


# 1. Caractéristiques physiques : Contexte Climatique

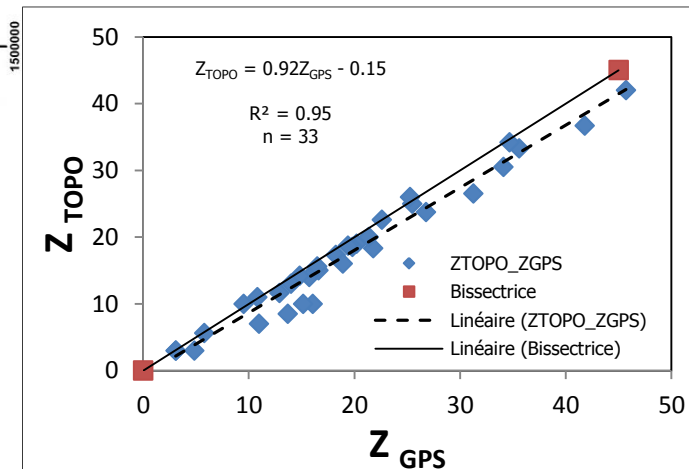




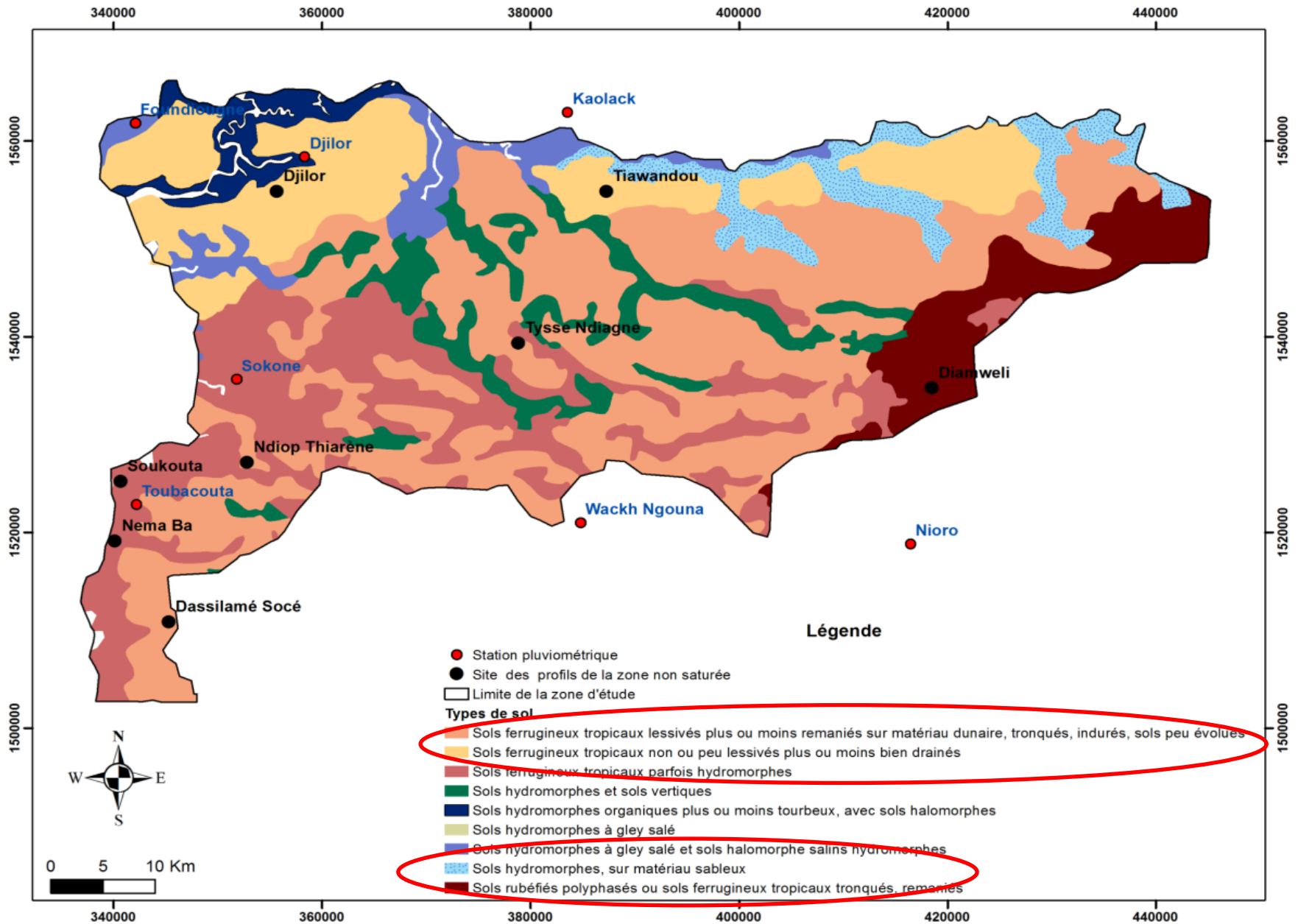
# 1. Caractéristiques physiques : Géomorphologie



Modèle numérique de terrain (avec une précision de +/- 4 m)

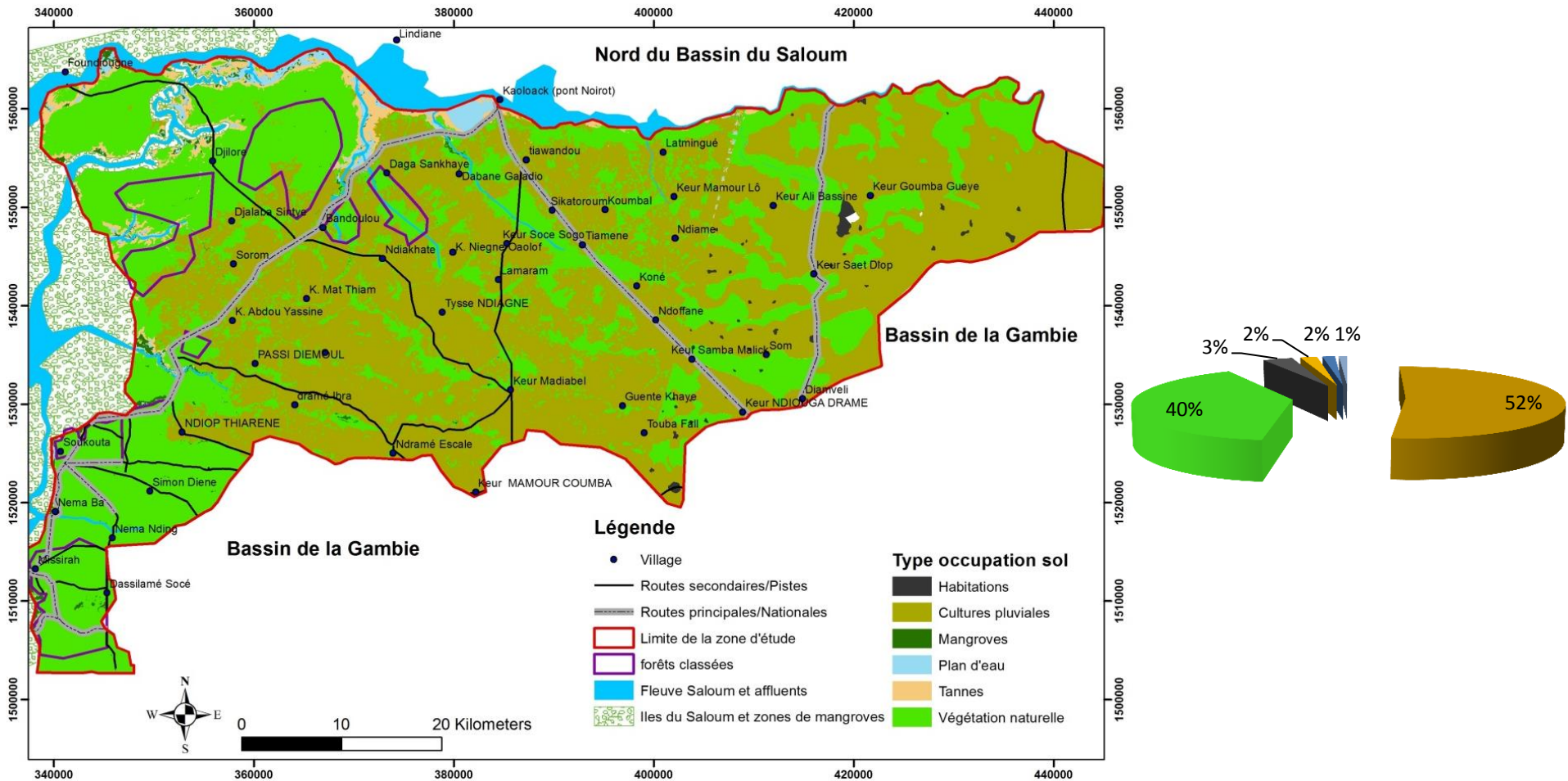


# 1. Caractéristiques physiques : Types de sol



Carte des sols extraite de la carte Pédologique au 1/500 000 (USAID, 1986)

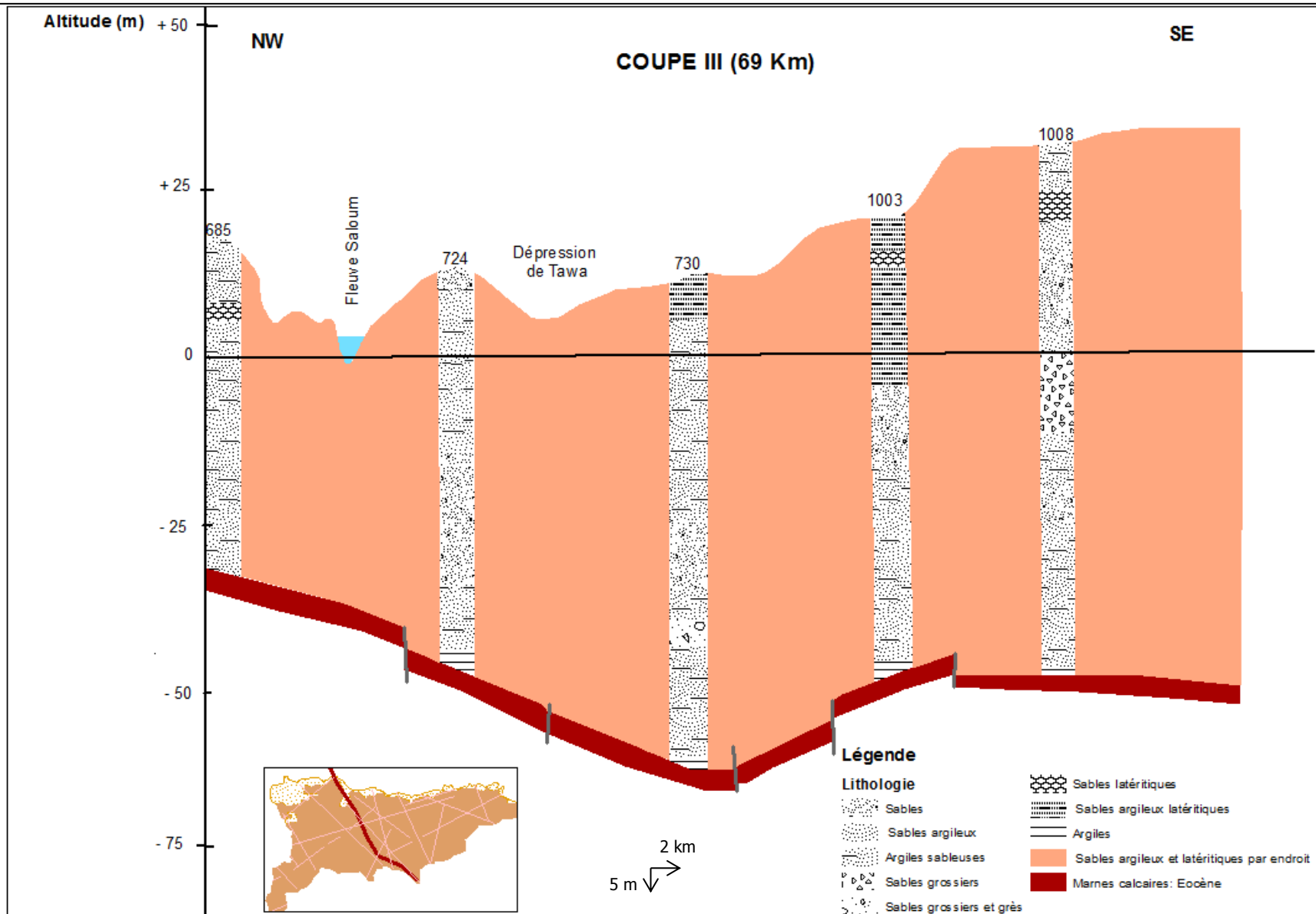
# 1. Caractéristiques physiques : Occupations des sols



		Reference 2012							
		1	2	3	4	5	6		UA (%)
Carte 2012	Habitations	18		1	4	5	6	19	<b>94</b>
	Cultures	1	17	1				19	<b>89</b>
	Mangroves	1	3	16	1			21	<b>76</b>
	Plan d'eau				18	1	1	20	<b>90</b>
	Tannes			1		17	2	20	<b>85</b>
	Végétation				1	2	17	20	<b>85</b>
			20	20	19	20	20	20	119
	PA (%)	<b>90</b>	<b>85</b>	<b>84</b>	<b>90</b>	<b>85</b>	<b>85</b>		

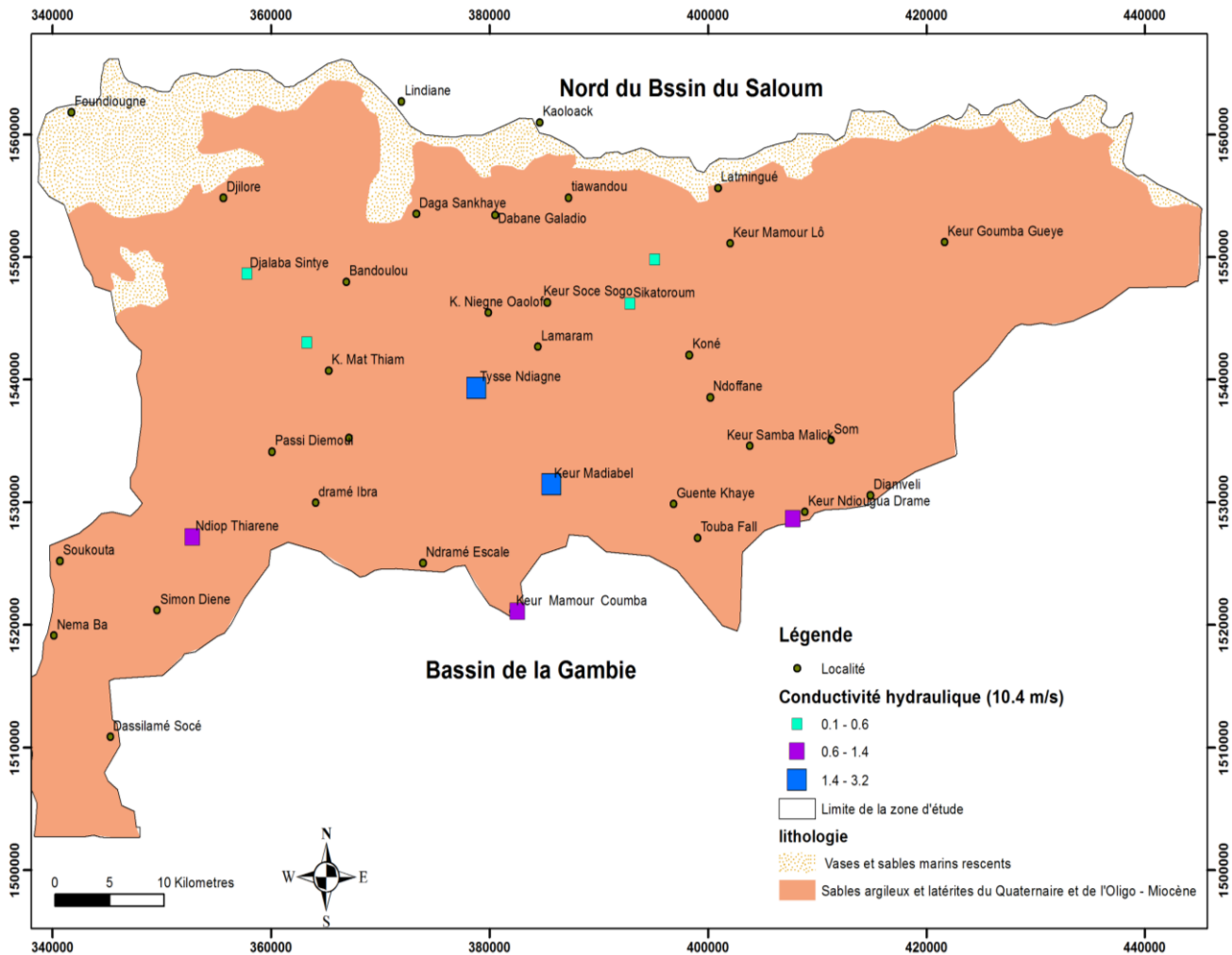
Kappa (0.85)  
précision globale (86 %)

## 2. Contexte géologique et hydrogéologique : **Lithologie et géométrie**



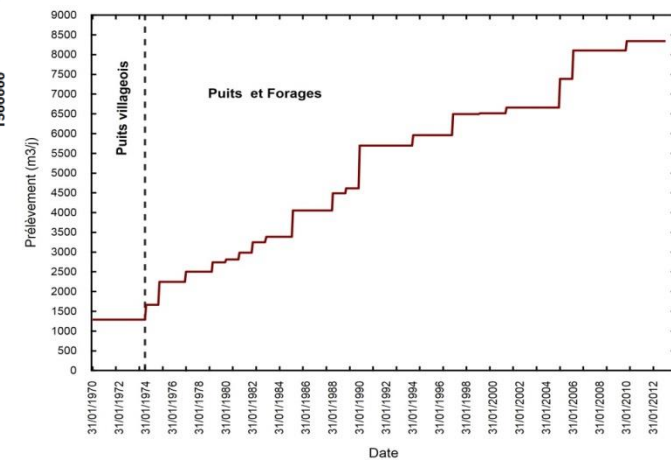
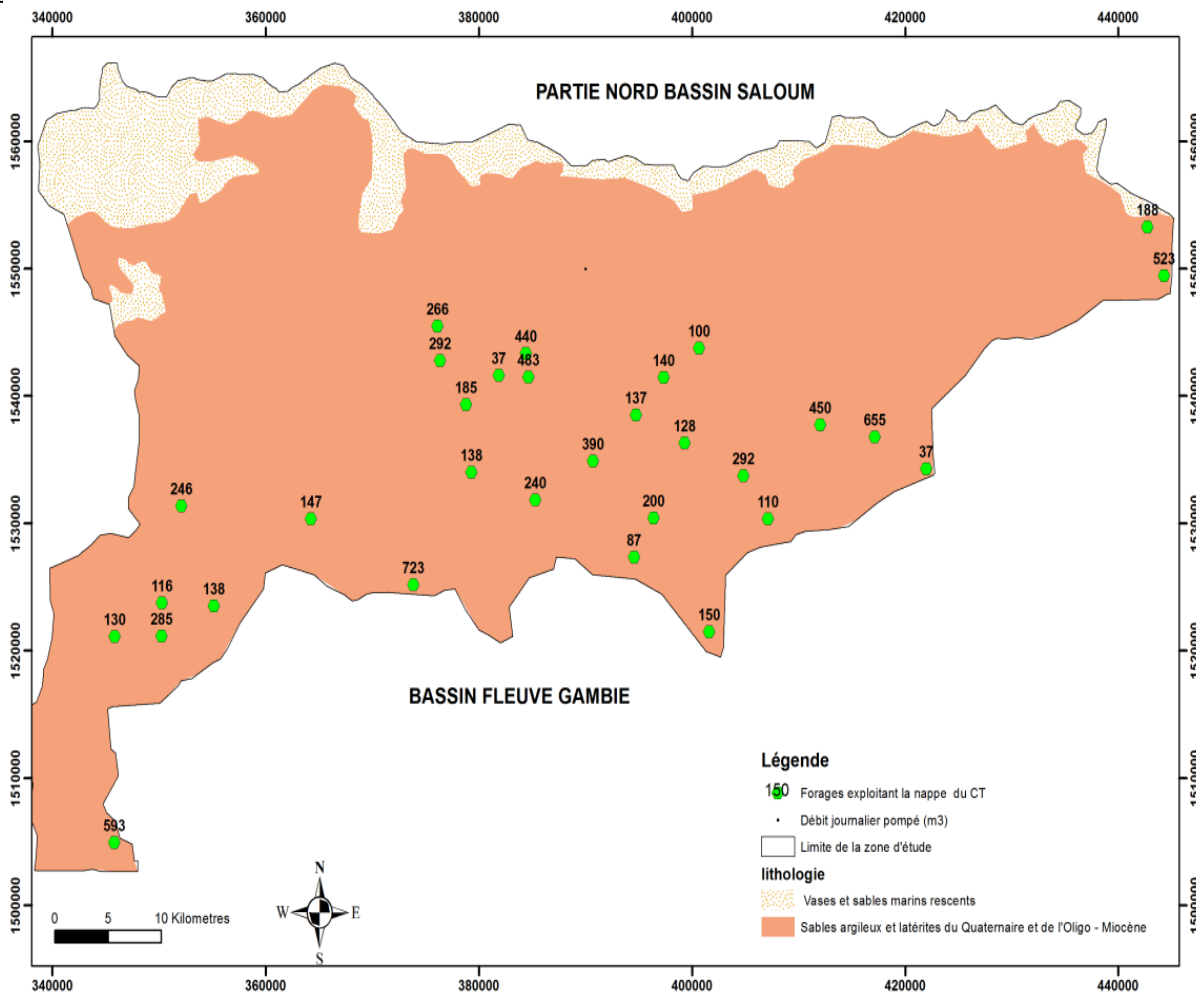
Oligocène - Mio-Pliocène – Quaternaire  
 Alternance irrégulière et discontinue des sédiments

## 2. Contexte géologique et hydrogéologique : Paramètres hydrodynamiques



	Minimum	Maximum
T (m <sup>2</sup> /s)	0.7 x 10 <sup>-02</sup>	7 x 10 <sup>-02</sup>
K (m/s)	0.1 x 10 <sup>-04</sup>	3.2 x 10 <sup>-04</sup>
S (-)	0.8 x 10 <sup>-02</sup>	21 x 10 <sup>-02</sup>

## 2. Contexte géologique et hydrogéologique : Sollicitation de la nappe



**Ouvrages**

**Volumes prélevés  
(m<sup>3</sup>/jour)**

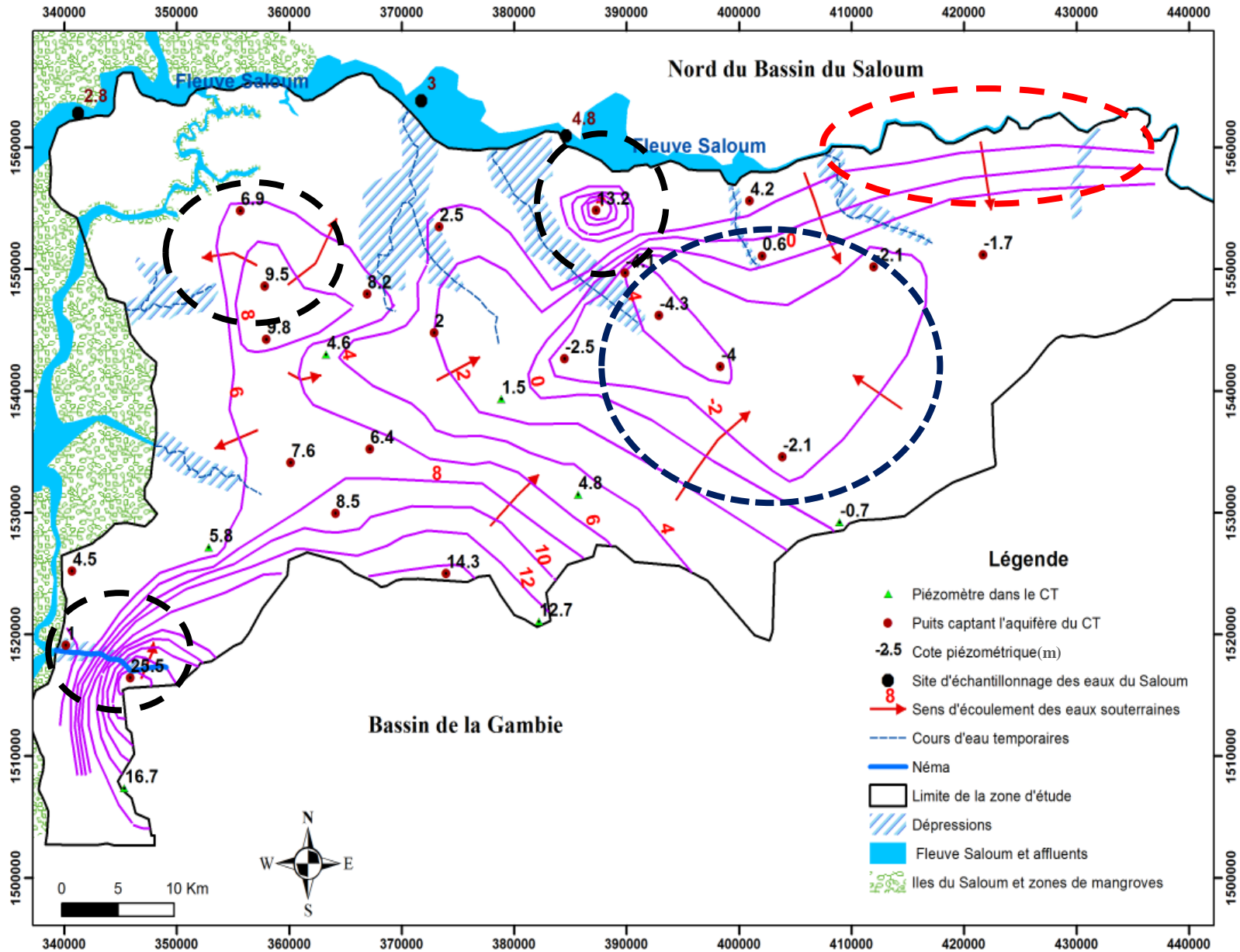
31 Forages  
(40 à 750 m<sup>3</sup>/jour)

7000

Puits villageois

1290

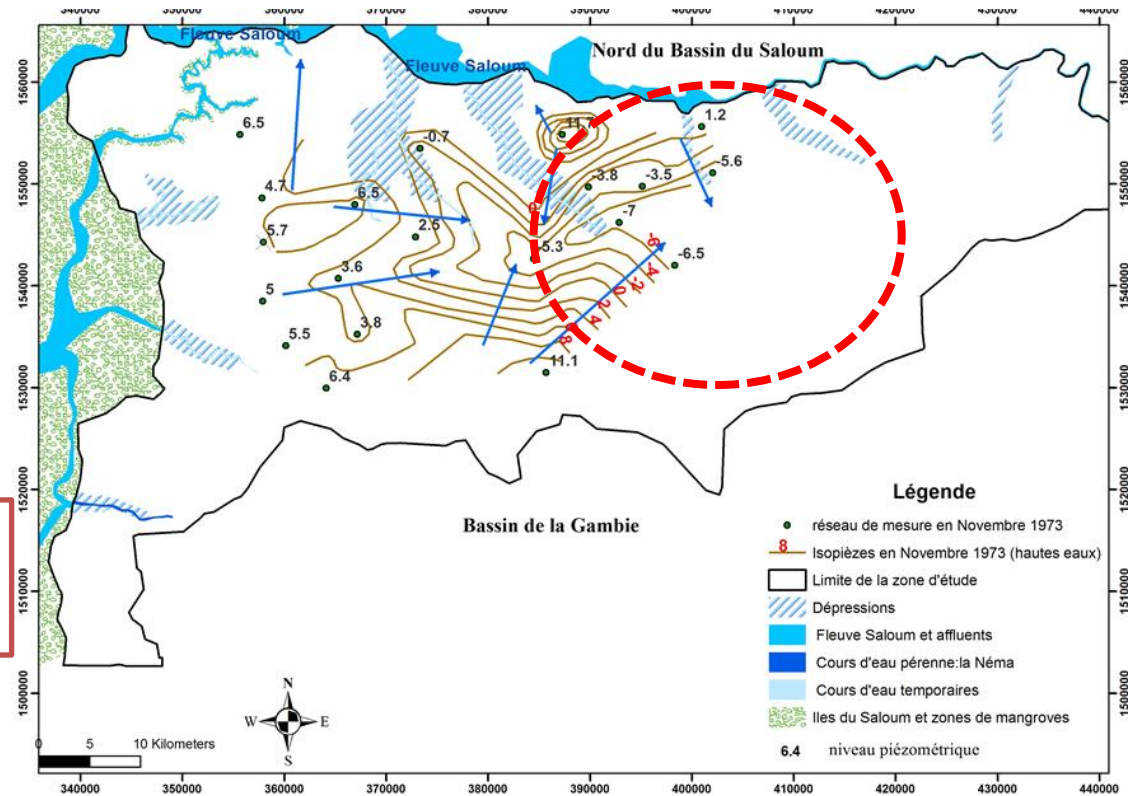
## 2. Contexte géologique et hydrogéologique : Piézométrie



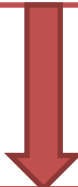
Carte piézométrique de la nappe du CT dans la zone d'étude en Mai 2012 (précision centimétrique) 15

## 2. Contexte géologique et hydrogéologique : Piézométrie

Correction et réinterprétation de la carte piézométrique de Novembre 1973

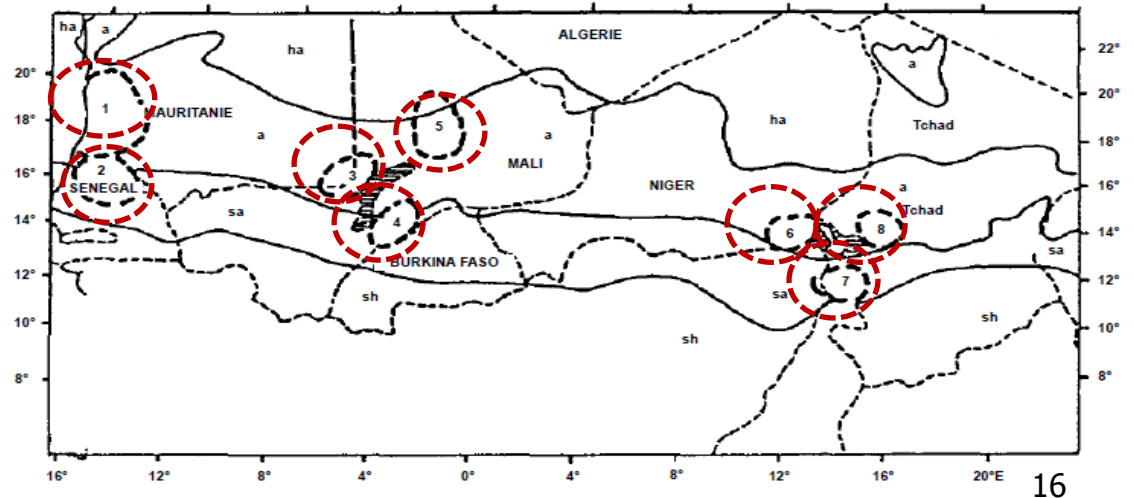


- Reprise évapotranspiratoire
- Aquifère de faible perméabilité horizontale



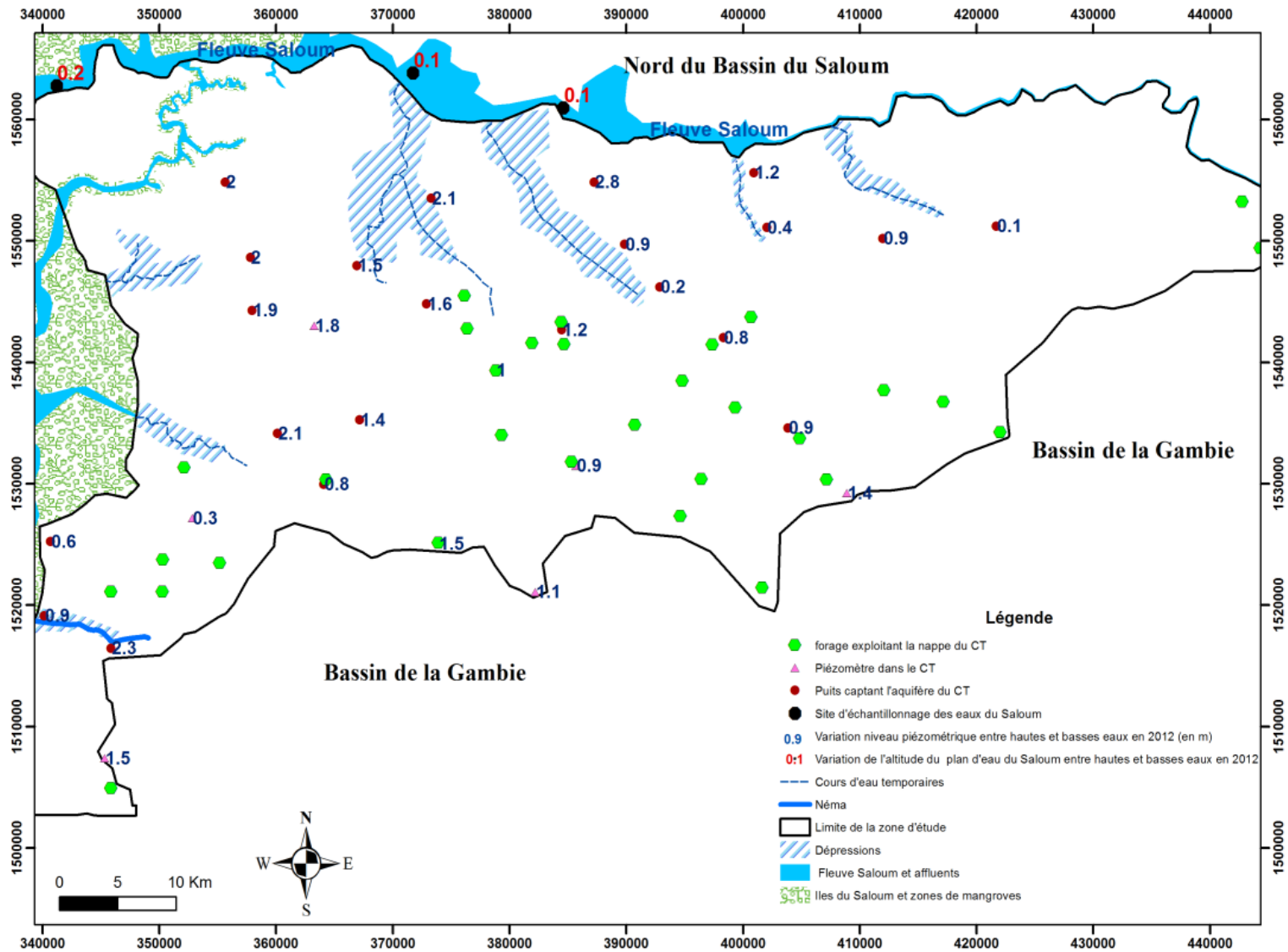
« nappe en creux »

Localisation des principales dépressions piézométriques, en zone sahélienne (Archambault, 1960 ; Dieng, 1987 ; Ndiaye et *al.*, 1993)





## 2. Contexte géologique et hydrogéologique : Piézométrie



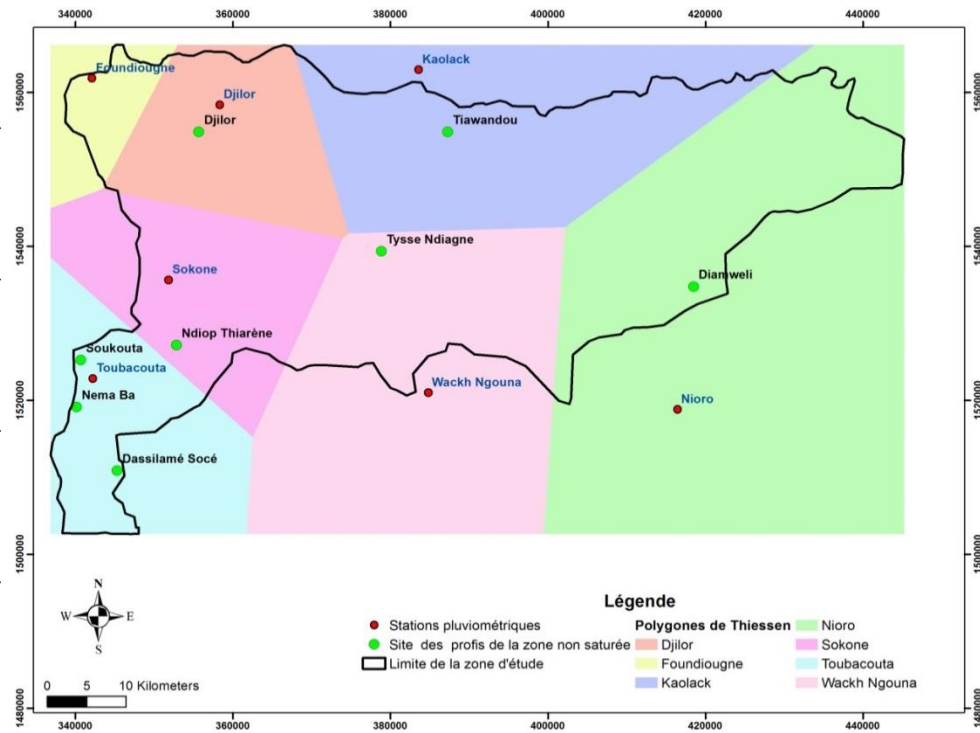
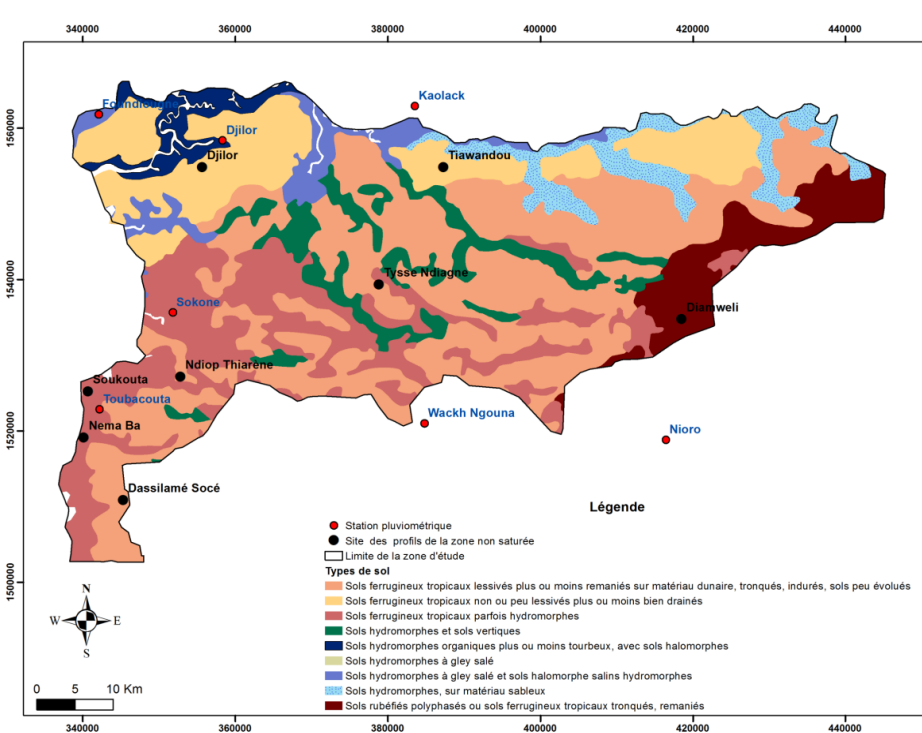
Variations de niveau entre saison **sèche** et saison **pluvieuse** en 2012 (+ 0.1 à + 2.8 m)

### 3. Recharge de la nappe : Données exploitées et méthodes

#### Estimation quantitative : Bilan des chlorures

$$R = \frac{Cl_p * P}{Cl_{ZNS}}$$

Travaux sur terrain (échantillons de sols, eaux de pluie)



#### Travaux de laboratoire (granulométrie, lixiviation et analyses chimiques)

### 3. Recharge de la nappe : Données exploitées et méthodes

#### □ Estimation quantitative : bilan hydrique (Avec ETo calculée par Penman)

$$P = ETR + \Delta S + R + I$$

$P$  = pluie de la période de temps considérée

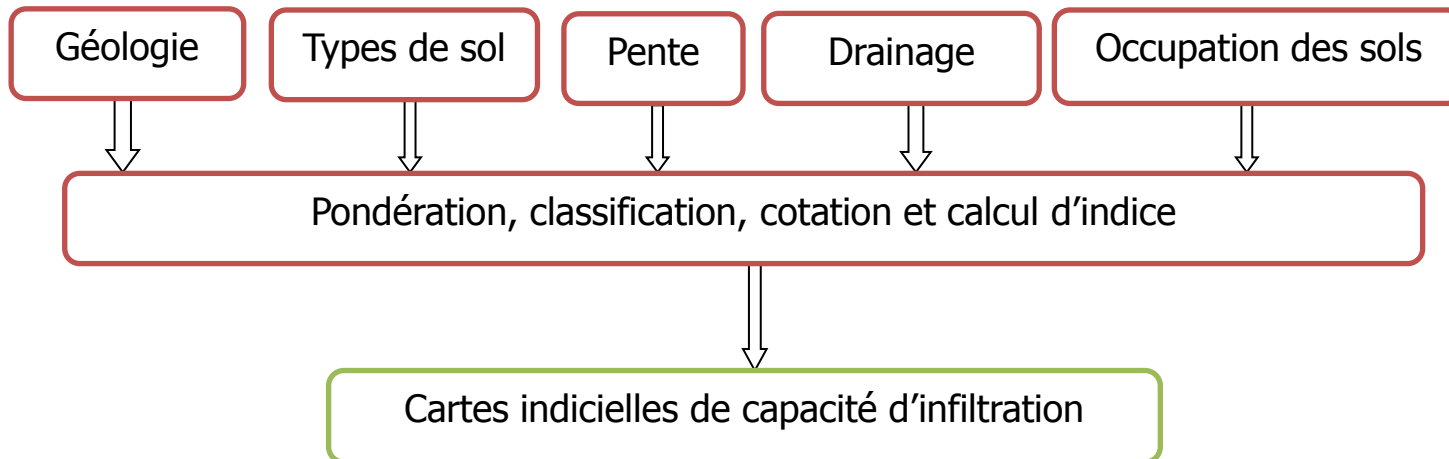
$ETR$  = évapotranspiration réelle de la période considérée

$\Delta S$  = variation de stock d'eau du sol pendant cette période considérée

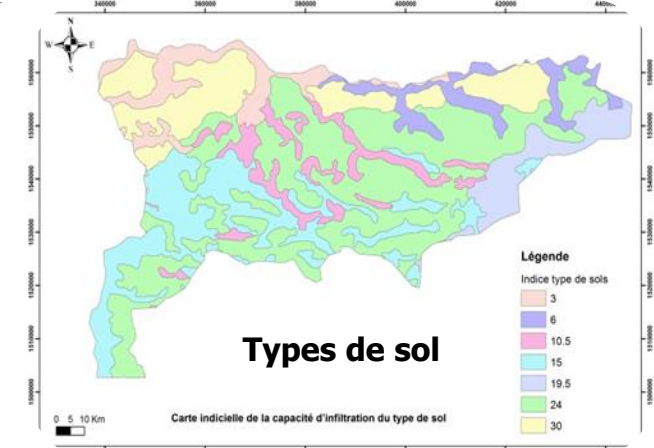
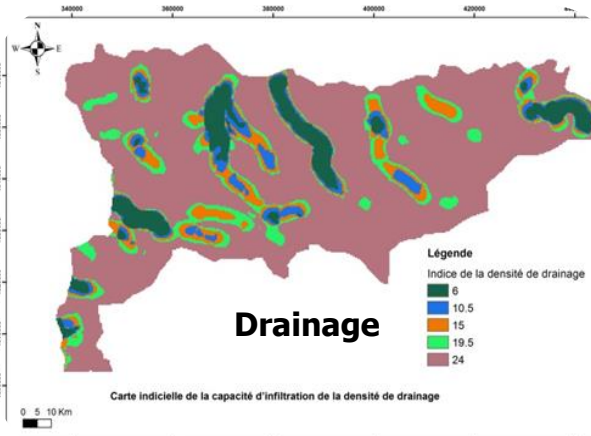
$R$  = ruissellement de la période considérée

$I$  = Infiltration de la période considérée

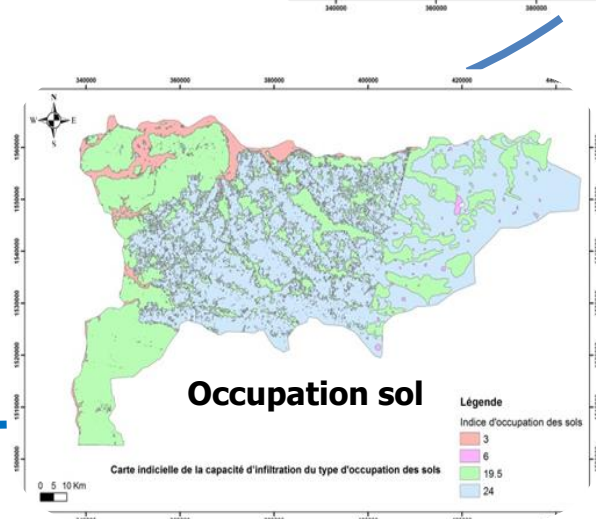
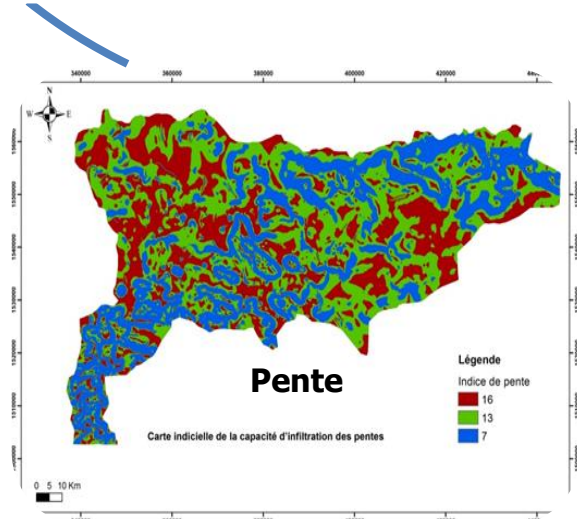
#### □ Estimation qualitative : Zones de recharge potentielle



# Spatialisation recharge



**Carte des zones de recharge potentielle**



### 3. Recharge de la nappe : Résultats

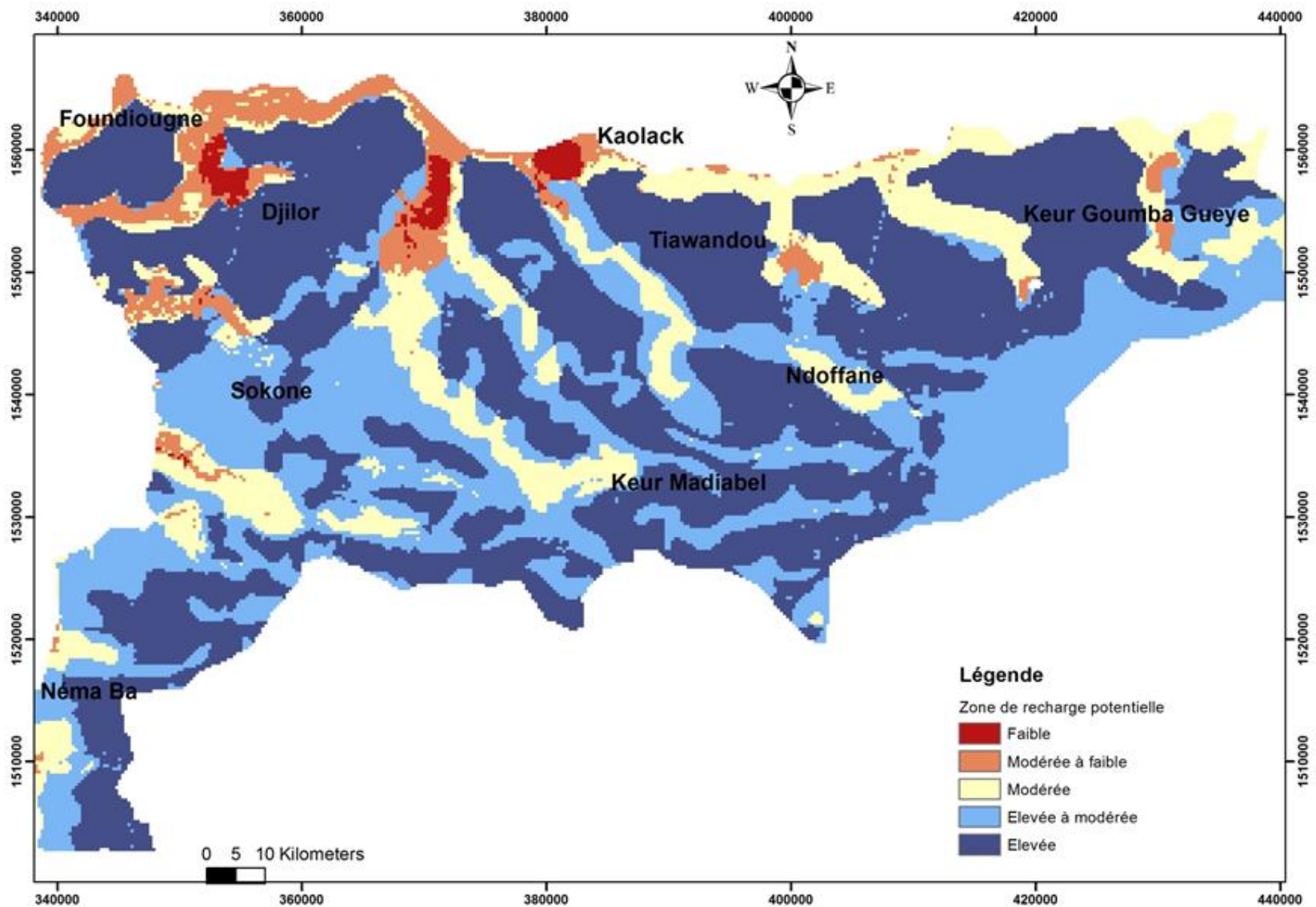
#### □ Estimation par le bilan des chlorures

Site	Pluie moyenne annuelle (P)(mm)	Teneur moyenne en Chlorure dans les eaux de pluie (Cp) (mg/L)	Teneur moyenne en Chlorure dans les profils (Cs) (mg/L)	Recharge moyenne annuelles (R)(mm/an)
Djilor	972	1.6	69.7	<b>22.3</b>
Tiawandou	781	6.7	94.5	<b>101.4</b>
Ndiop Thiaréne	1124	1.5	37.2	<b>35.6</b>
Dassilamé	1129	1.3	48.6	<b>29.5</b>
Thyssé	906	1.0	63.5	<b>17.7</b>

#### □ Estimation par le bilan hydrique

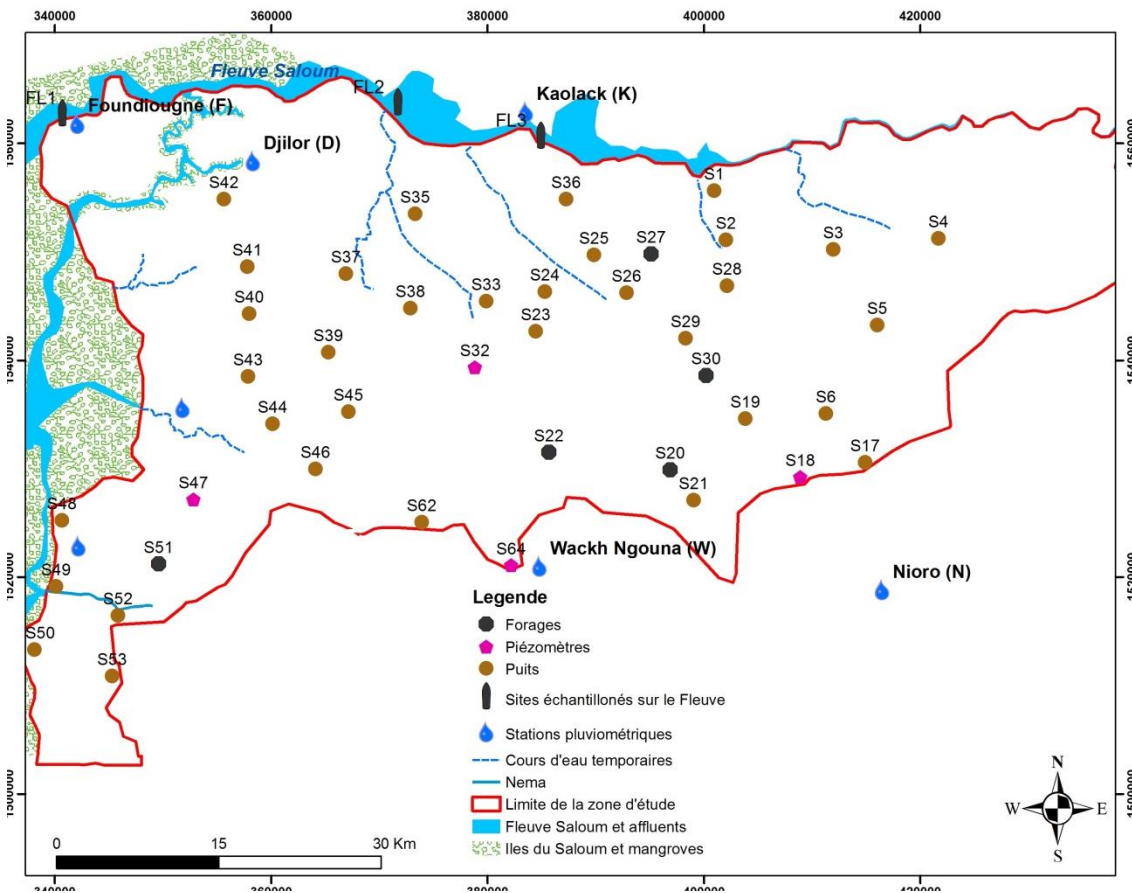
Stock en eau du sol	Kaolack	Nioro
103	<b>47.7</b>	<b>130.3</b>
125	<b>35.7</b>	<b>110.3</b>
145	<b>29.7</b>	<b>99.1</b>
167	<b>22.2</b>	<b>83.8</b>
177	<b>19.4</b>	<b>78</b>

### 3. Recharge de la nappe : Résultats



Carte des zones de recharge potentielle de la nappe du CT dans la partie Sud du Bassin du Saloum

## 4. Hydrogéochimie : Données exploitées et méthodes



2 campagnes de suivi en 2012 (Mai (Basses eaux) et Novembre (Hautes eaux)

44 ouvrages (forages, piézomètres et puits) 3 points (eaux de surface)

### Paramètres mesurés *in situ*

Conductivité électrique (CE)

Température (T)

pH

### Paramètres analysés

Majeurs

Mineurs

Isotopes stables

### Traitement

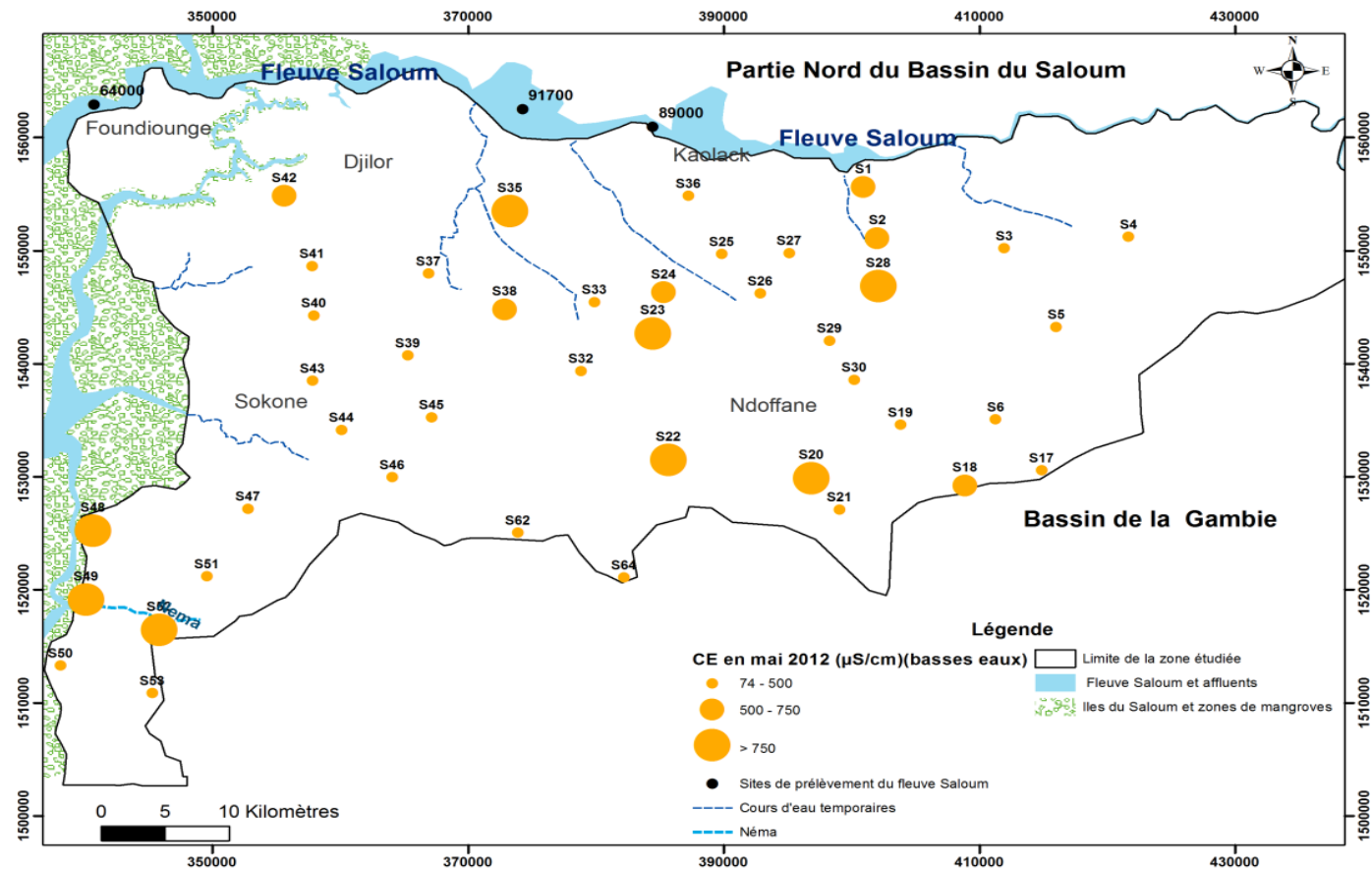
Outils géochimiques

Statistique multivariée



## 4. Hydrogéochimie : Variation de la conductivité électrique

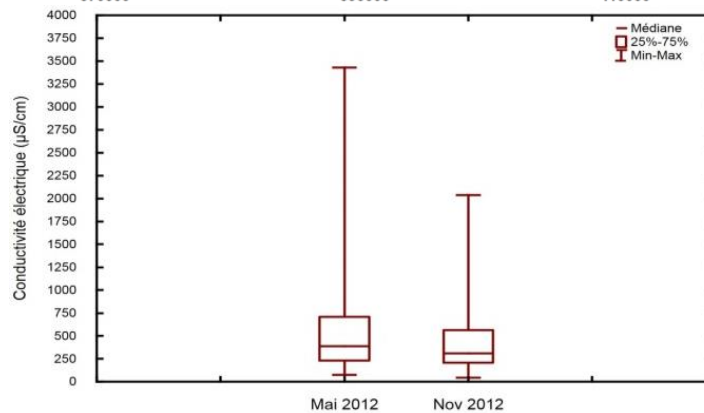
Distribution spatiale des valeurs de CE dans la nappe du CT et dans le fleuve Saloum en Mai 2012 (Basses eaux)



Eaux du fleuve : 50800 et 91700  $\mu\text{S}/\text{cm}$   
Eau de mer : 39250  $\mu\text{S}/\text{cm}$

Nappe : 47 et 3430  $\mu\text{S}/\text{cm}$   
Eaux douces  
Eaux considérées salées

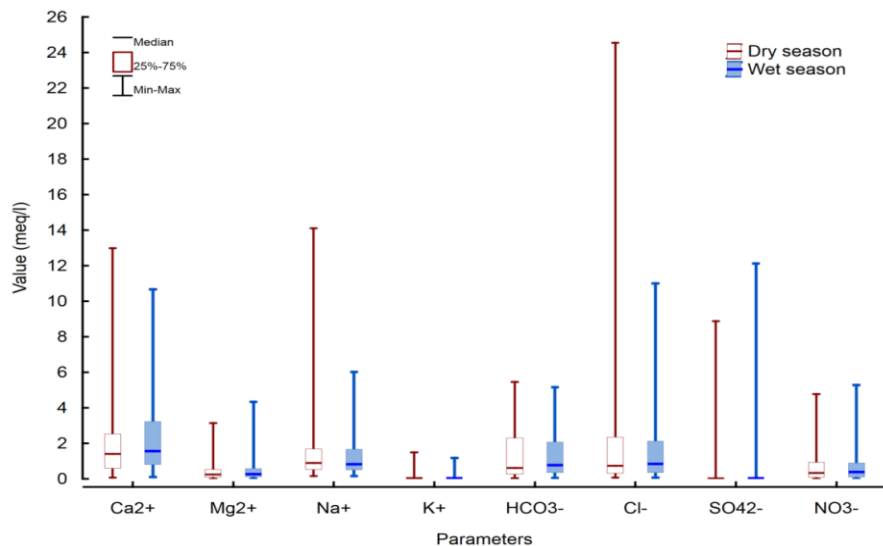
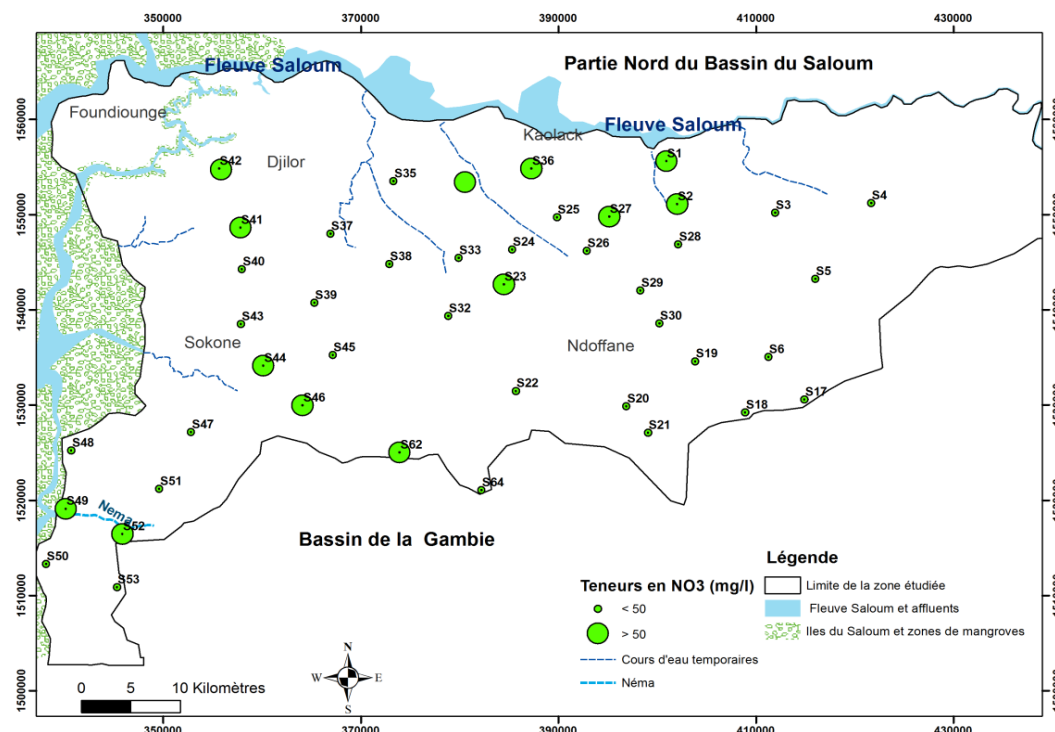
Diminution de la minéralisation en hautes eaux



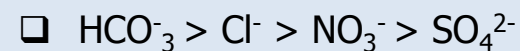
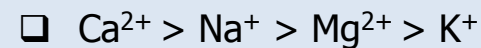


# 4. Hydrogéochimie : Origine de la minéralisation des eaux

Pollution ponctuelle de certains ouvrages  
**(50 mg/L < NO<sub>3</sub><sup>-</sup> < 327 mg/L)**



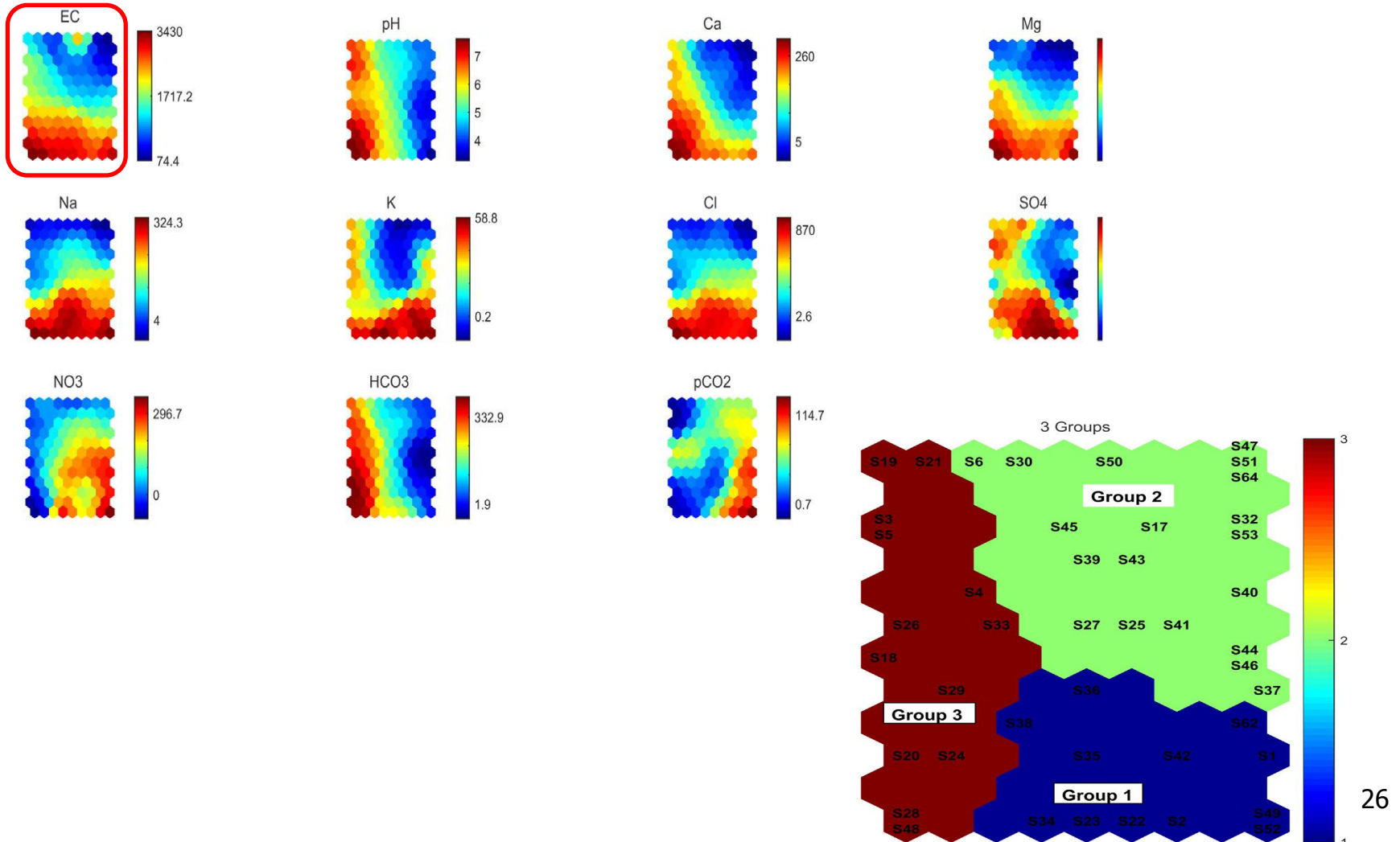
Ordre d'abondance (méq/L) globale des ions :



# 4. Hydrogéochimie : Origine de la minéralisation des eaux

## Analyse des corrélations par la méthode du SOM

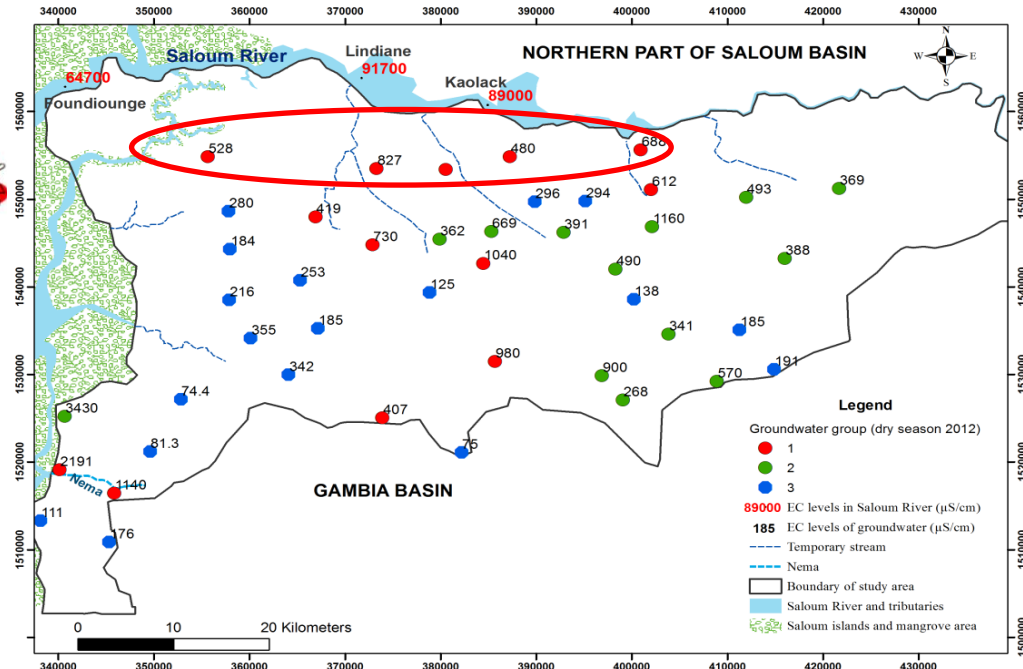
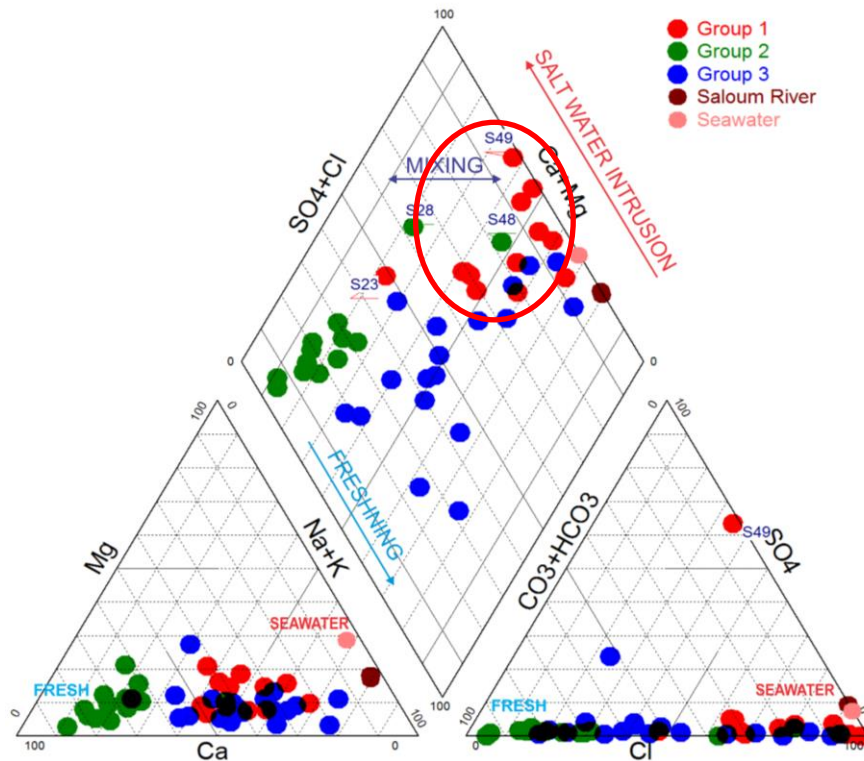
- ❑ Corrélation entre Na et Cl, Mg et K
- ❑ Corrélation prononcée pour les HCO<sub>3</sub> et le pH
- ❑ Corrélation dans une moindre mesure entre Ca et SO<sub>4</sub>



# 4. Hydrogéochimie : Origine de la minéralisation des eaux

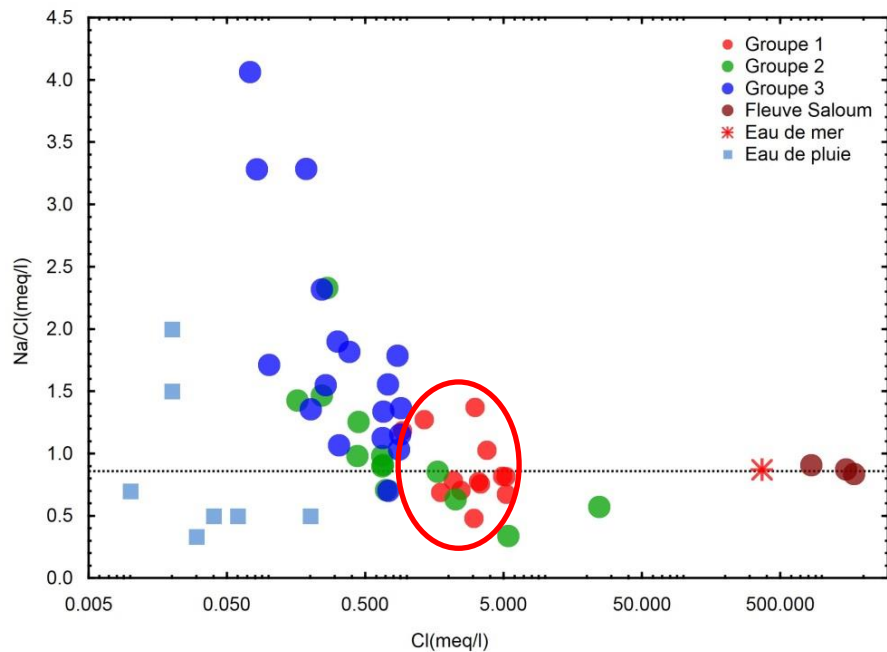
## Groupe 1

- ❑ Très minéralisées : CE moyenne 948.2  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (basses eaux) et 872  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (hautes eaux)
- ❑ Fortes teneurs en  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{SO}_4^-$  et faibles teneurs en  $\text{HCO}_3^-$
- ❑ Facies chloruré sodique et chloruré calcique



- ❑ **Intrusion d'eau salée** provenant de la mer et/ou du fleuve Saloum et par la pollution anthropique

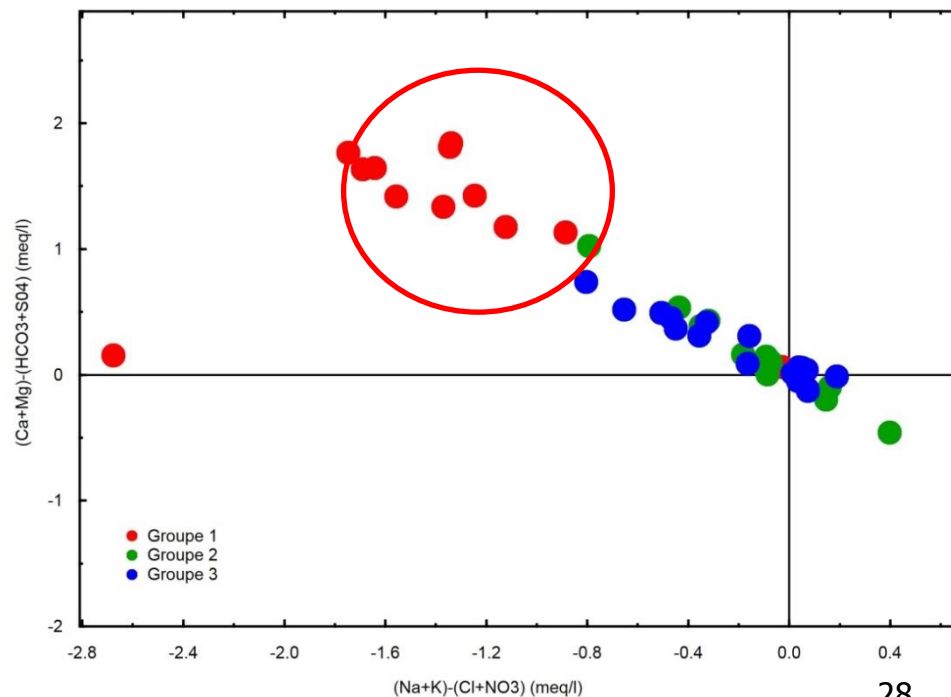
## 4. Hydrogéochimie : Origine de la minéralisation des eaux



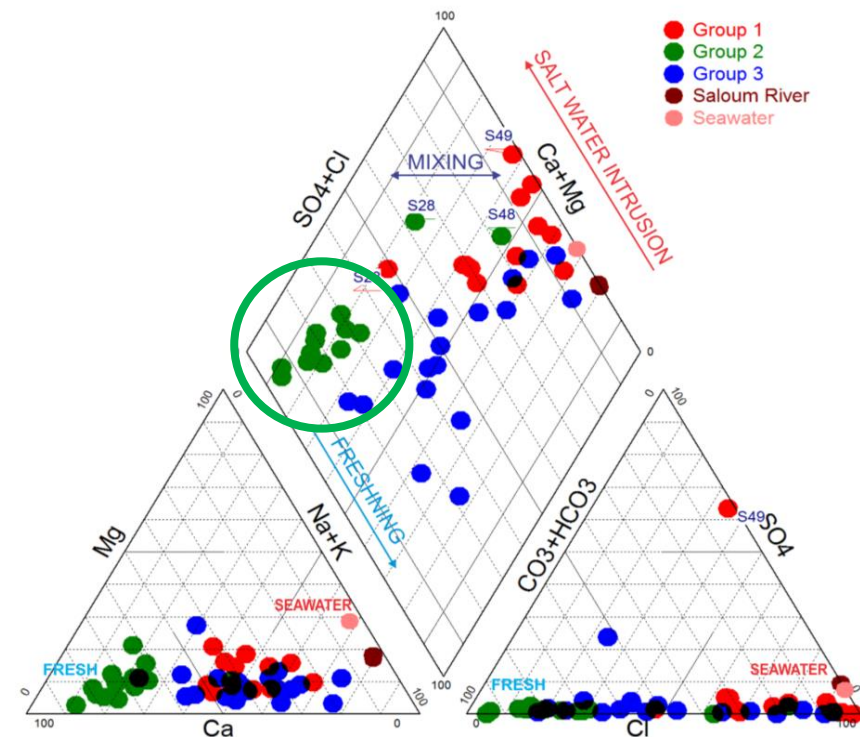
### Groupe 1

- Rapport ionique (Na/Cl) proche de celui de l'eau de mer (0.86) (origine marine de ces ions)

- Diminution  $\text{Na}^+$  par rapport  $\text{Cl}^-$  : échanges cationiques (évidence dans le diagramme  $[(\text{Ca}+\text{Mg})-(\text{HCO}_3+\text{SO}_4)]$  versus  $[(\text{Na}-\text{Cl})-(\text{Cl}+\text{NO}_3)]$ )



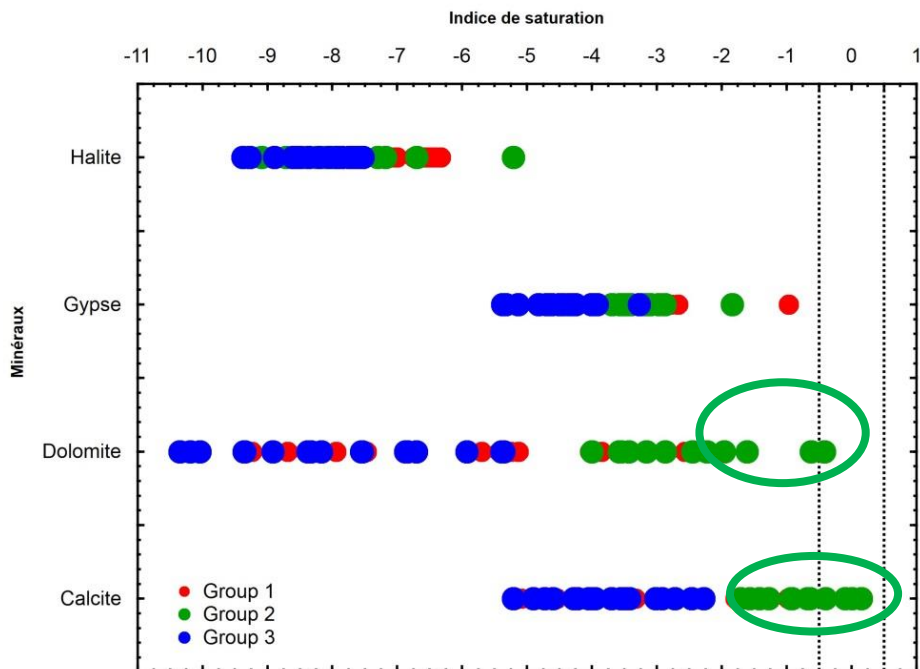
# 4. Hydrogéochimie: Origine de la minéralisation des eaux



- Indice de saturation
- Présence de calcite (Lappartient, 1985)
- Interactions eau-roche** (dissolution de la calcite)

## Groupe 2

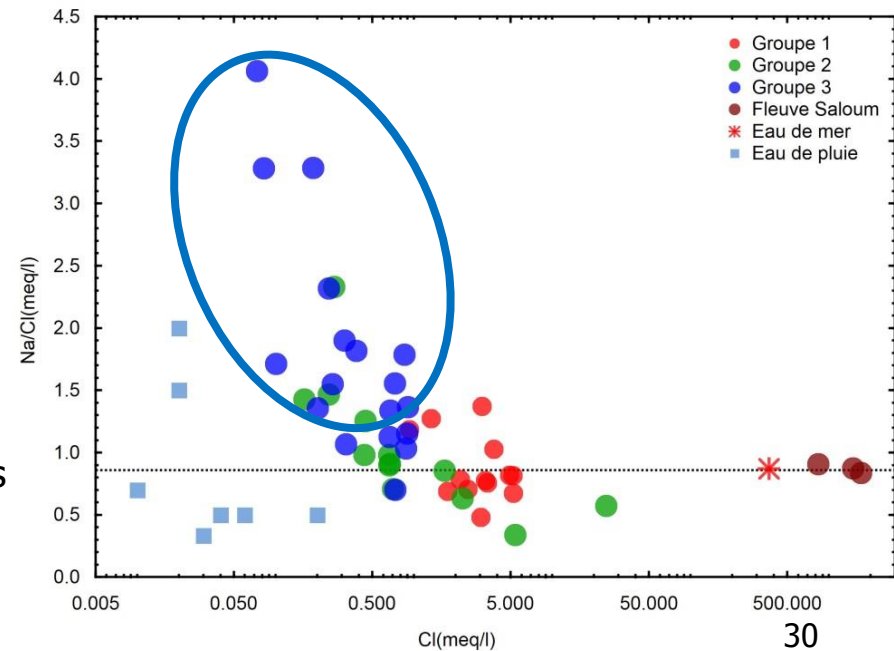
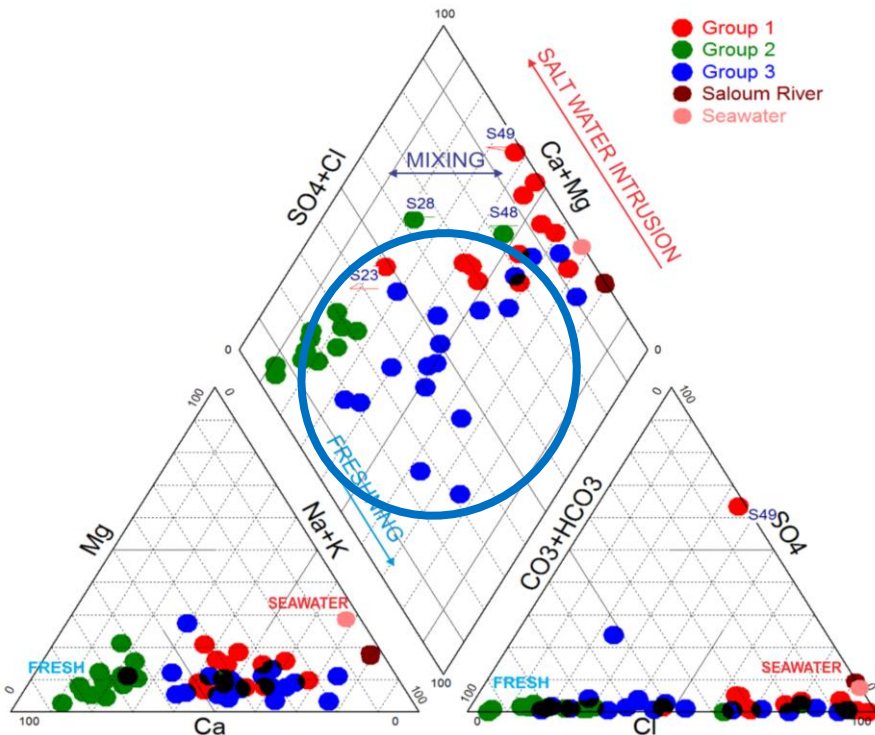
- Minéralisation moyenne : CE moyennes 756  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (basses eaux) et 395  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (hautes eaux)
- Teneurs élevées en  $\text{HCO}_3^-$
- Facies  $\text{Ca-HCO}_3$



## 4. Hydrogéochimie : Origine de la minéralisation des eaux

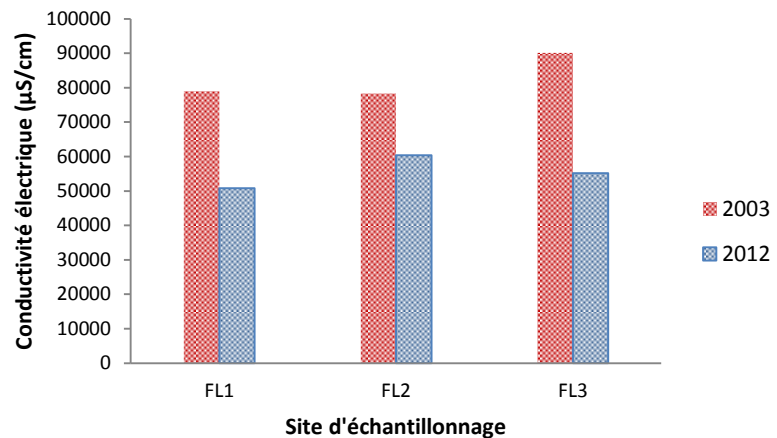
### Groupe 3

- Moins minéralisées CE moyenne 342  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (basses eaux) 74  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (hautes eaux)
- CE inférieure à 250  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (70 % des points)  
Faibles concentrations ions majeurs
- Type  $\text{Na}-\text{HCO}_3$  (33 %),  $\text{Na}-\text{Cl}$  (33 %),  $\text{Ca}-\text{HCO}_3$  (22 %) et  $\text{Ca}-\text{Cl}$  (12 %)



- Augmentation des  $\text{Na}^+$  par rapport  $\text{Cl}^-$
- Apport d'eau douce** : infiltrations des eaux de pluies

## 4. Hydrogéochimie : Évolution de la minéralisation des eaux entre 2003 et 2012

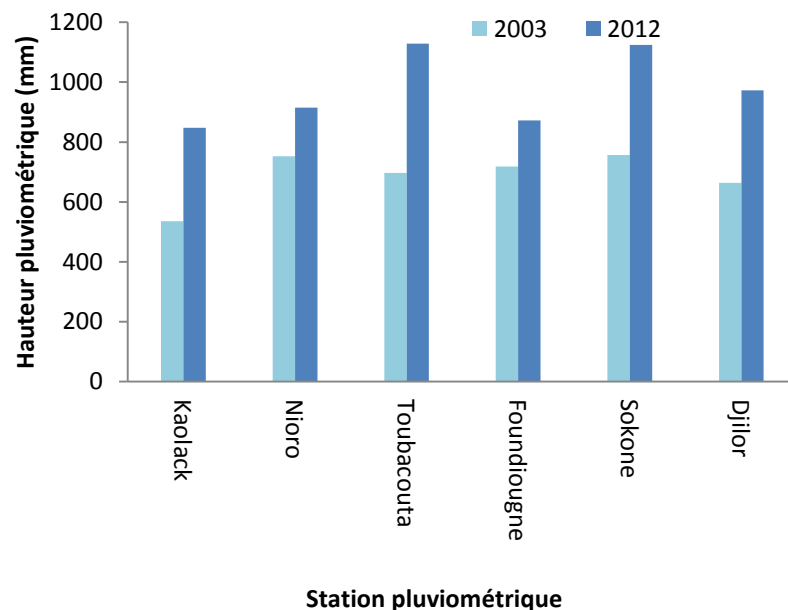
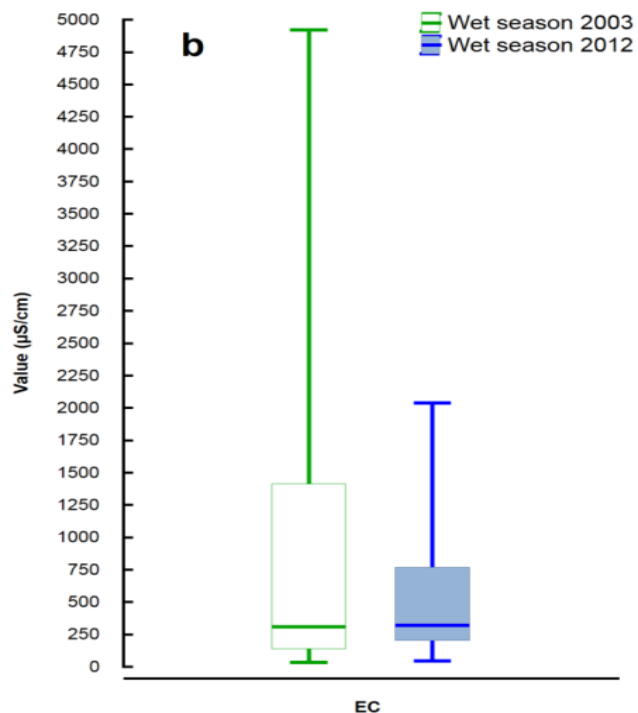


☐ Diminution de la minéralisation

Fleuve Saloum : 78 300 et 90 100 µS/cm (Novembre 2003) à 50 800 – 60 400 µS/cm (Novembre 2012)

Nappe du CT : 817 µS/cm (2003) à 520 µS/cm (2012)

☐ Augmentation des précipitations



## 4. Hydrogéochimie : Évolution de la minéralisation des eaux entre 2003 et 2012

### ☐ Eaux salées du groupe 1 :

Baisse de CE (2 099  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en 2003 à 1 250  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en 2012)

Baisse des teneurs en Na et en Cl : facies Na-Cl vers Ca-Cl (adoucissement et intrusion eau moins minéralisée)

### ☐ Eaux du groupe 2 :

Augmentation de CE (353  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en 2003 et 587  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en 2012)

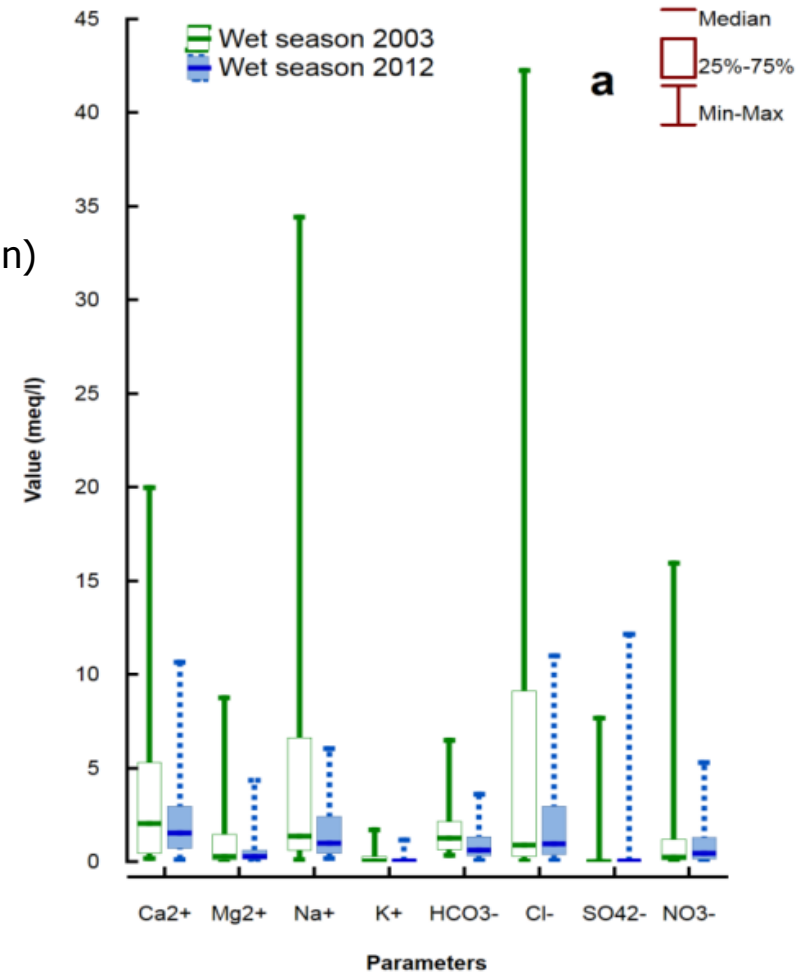
Enrichissement  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  et/ou  $\text{NO}_3^-$  (dissolution calcite et pollution)

### ☐ Eaux du groupe 3 :

Baisse de CE (1750  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en 2003 à 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en 2012)

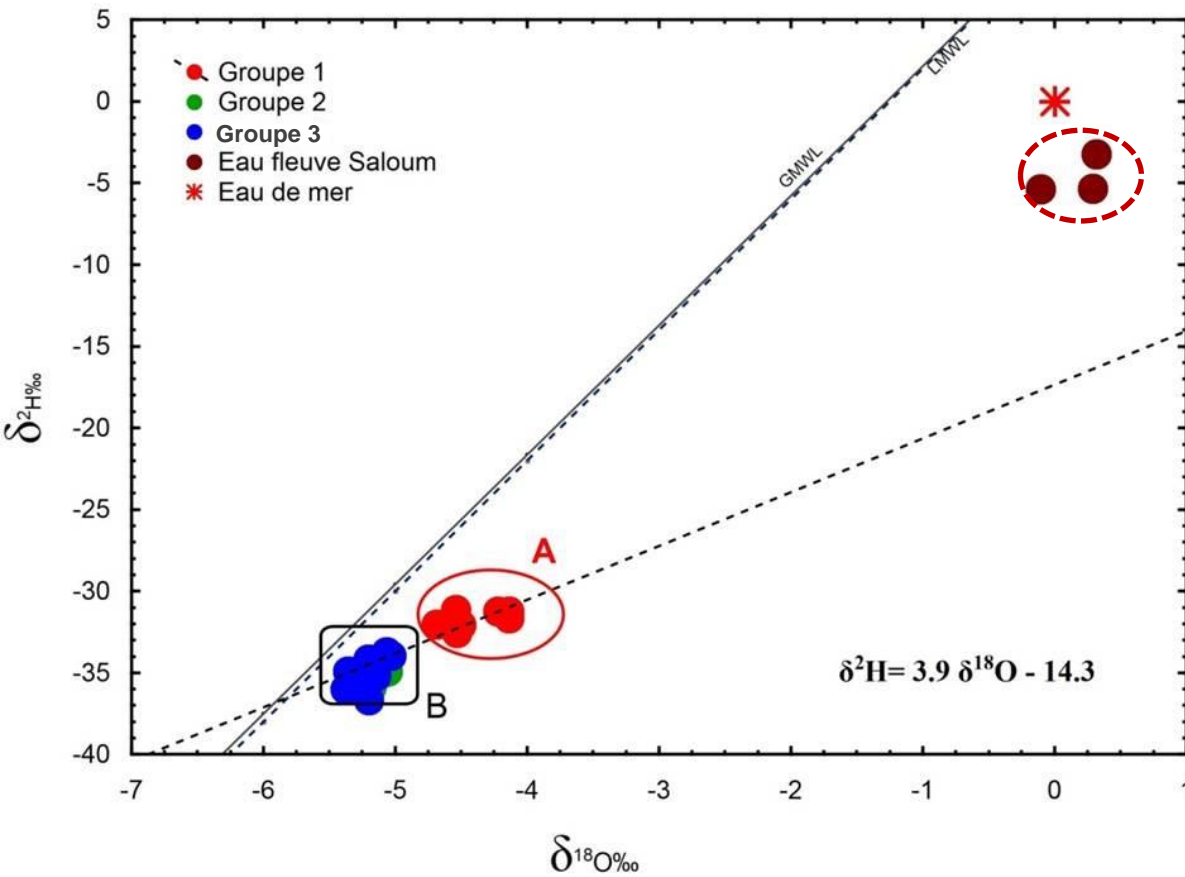
Augmentation (974  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à 1539  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )

Effets combinés intrusion marine et recharge





## 4. Hydrogéochimie : Apport de l'analyse isotopique des eaux



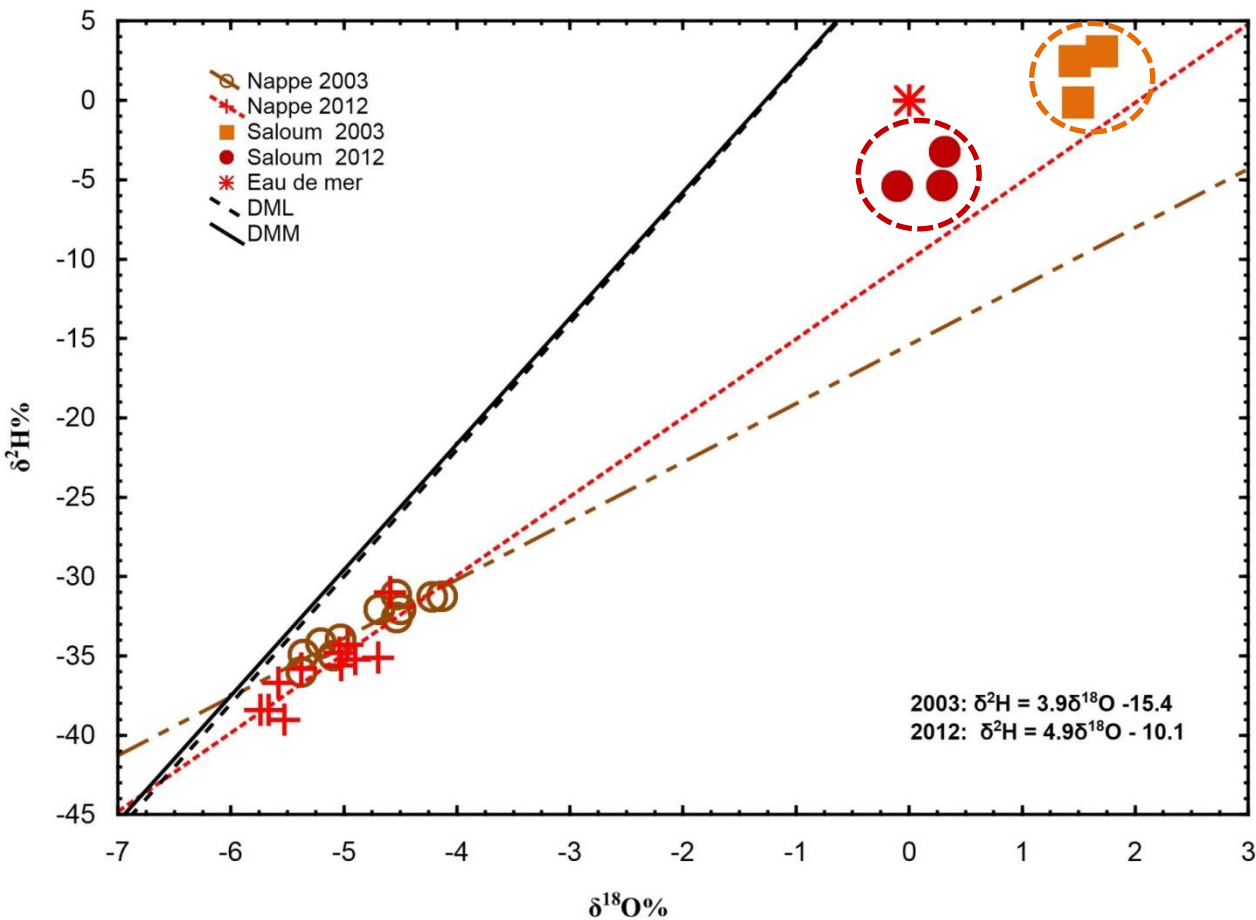
□ Eaux du fleuve Saloum  
Enrichissement par évaporation

□ Eaux souterraines  
Déviation de la droite (pente 3.9)  
Enrichissement (évaporation)

Ensemble A (G1) plus enrichi en isotopes stables (influence eau de surface )

Ensemble B (G2 et G3) moins enrichi en isotopes stables

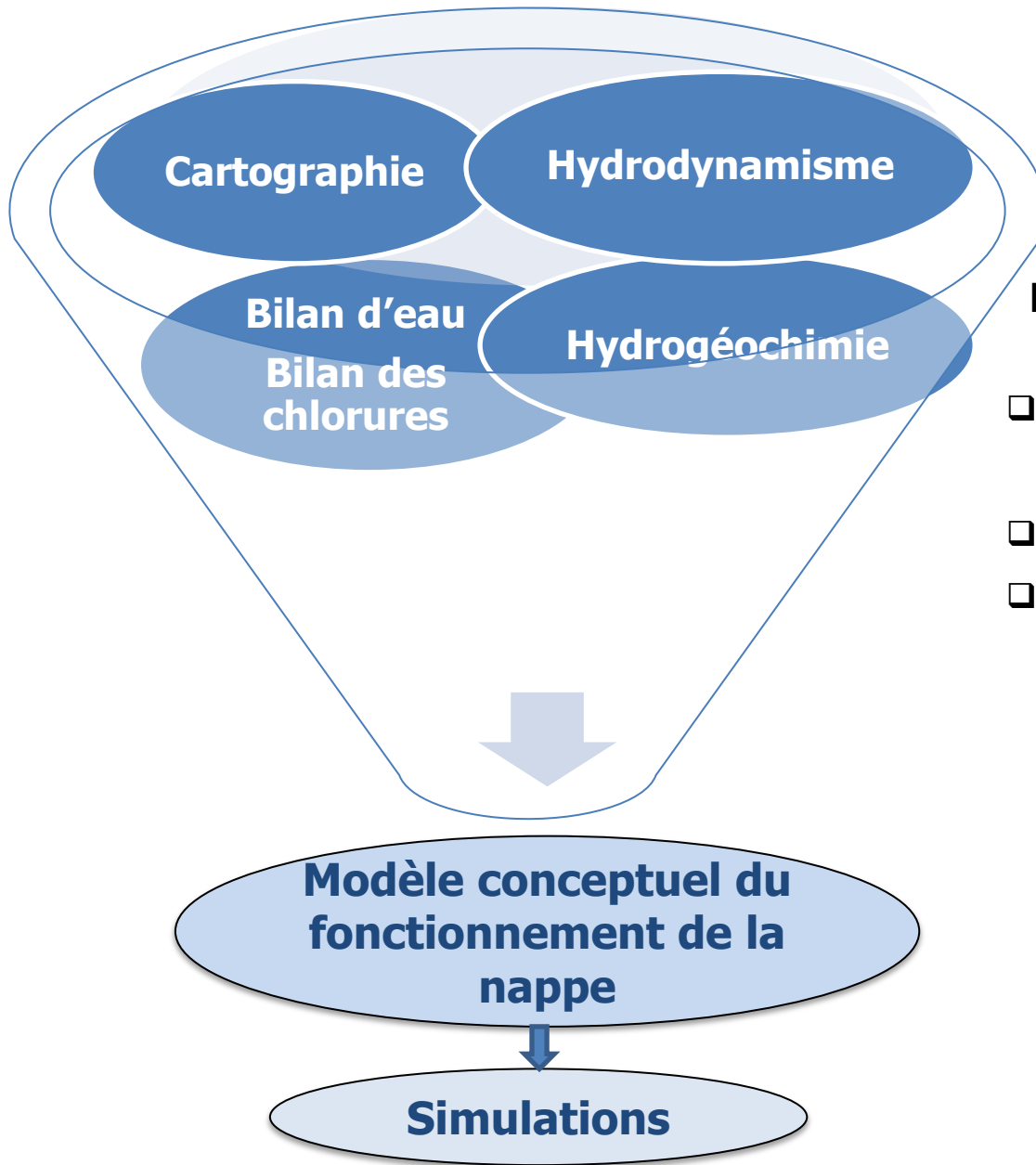
## 4. Hydrogéochimie : Apport de l'analyse isotopique des eaux



□ Eaux du fleuve Saloum  
Enrichissement entre 2003 et 2012  
(Précipitations)

□ Eaux souterraines

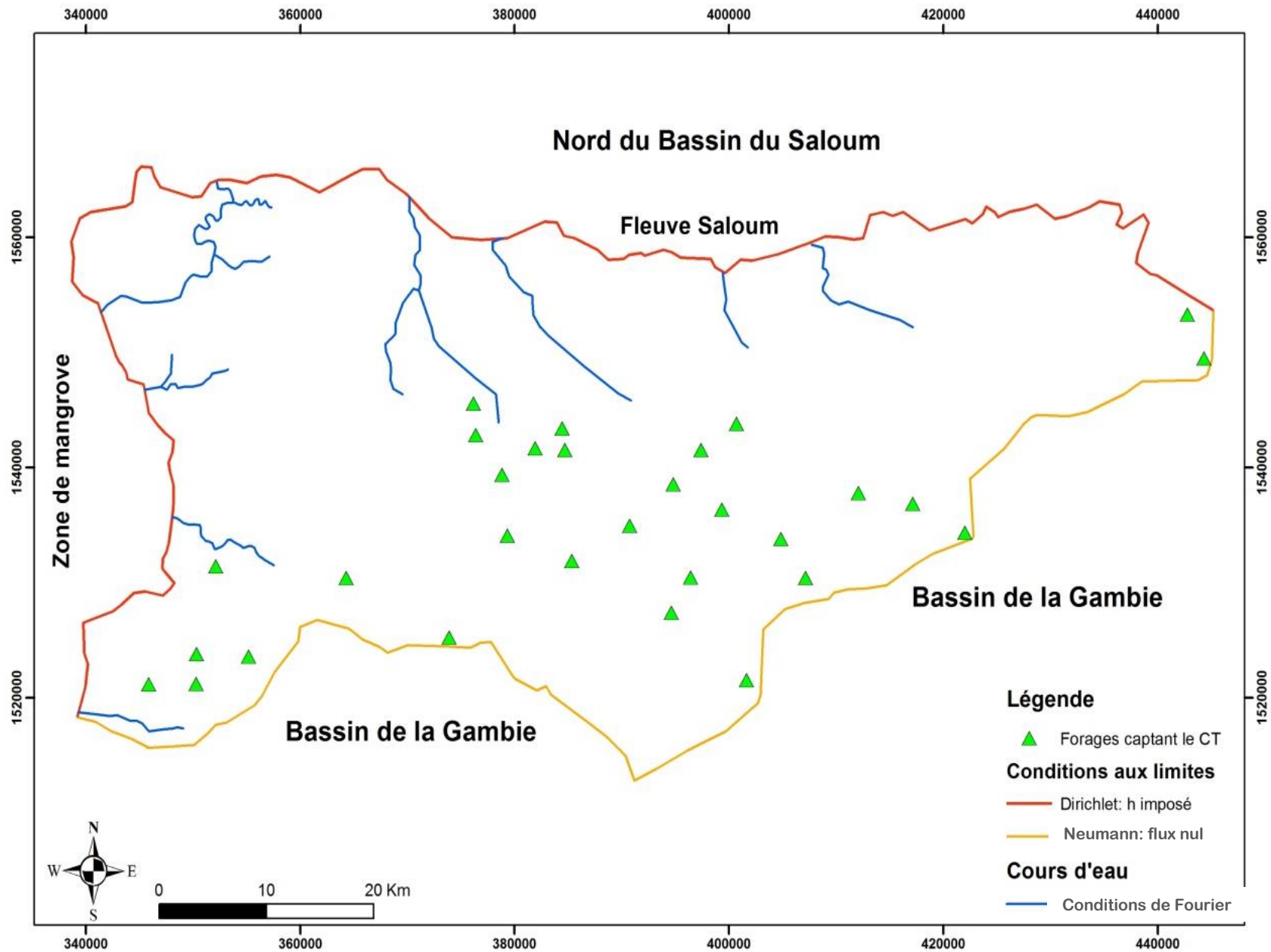
Déviations de la droite de 2003 plus importantes (enrichissement par évaporation)



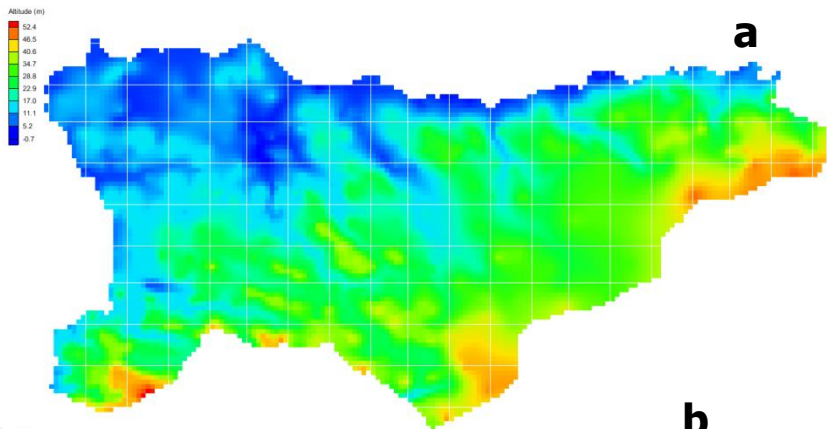
## Limitations du modèle

- ❑ Manque de données historiques (calibration régime transitoire)
- ❑ Incertitude des paramètres hydrodynamiques
- ❑ Dépression piézométrique (contrainte majeure) (« Nappe en creux »)

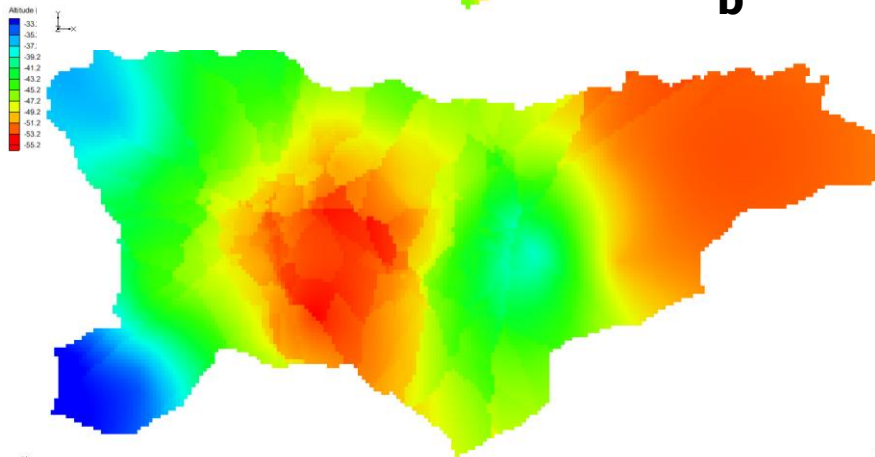
## 5. Modélisation : **Modèle Conceptuel**



# 5. Modélisation : **Modèle Conceptuel**



**a**



**b**

a) limite supérieure et b) base de l'aquifère du CT

## Dimension du modèle

Limite supérieure (Surface topographique)

Limite inférieure substratum marneux imperméable

Modèle monocouche 2 D

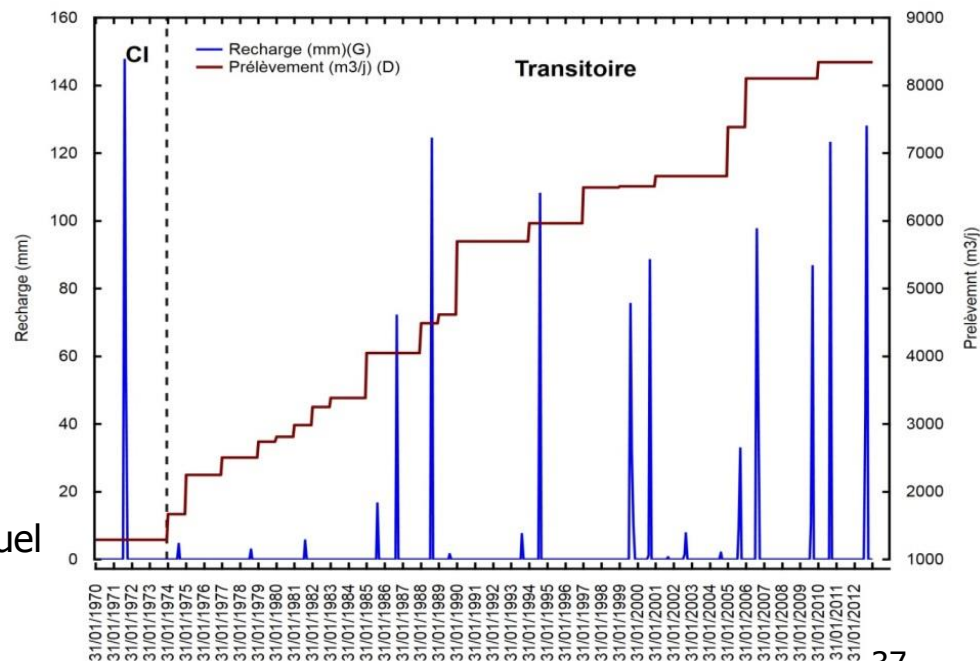
## Discrétisation spatiale

Maillage régulier 250 m

## Discrétisation temporelle du modèle

Conditions initiales (1970-1973)

Régime transitoire (1974-2012) pas de temps mensuel

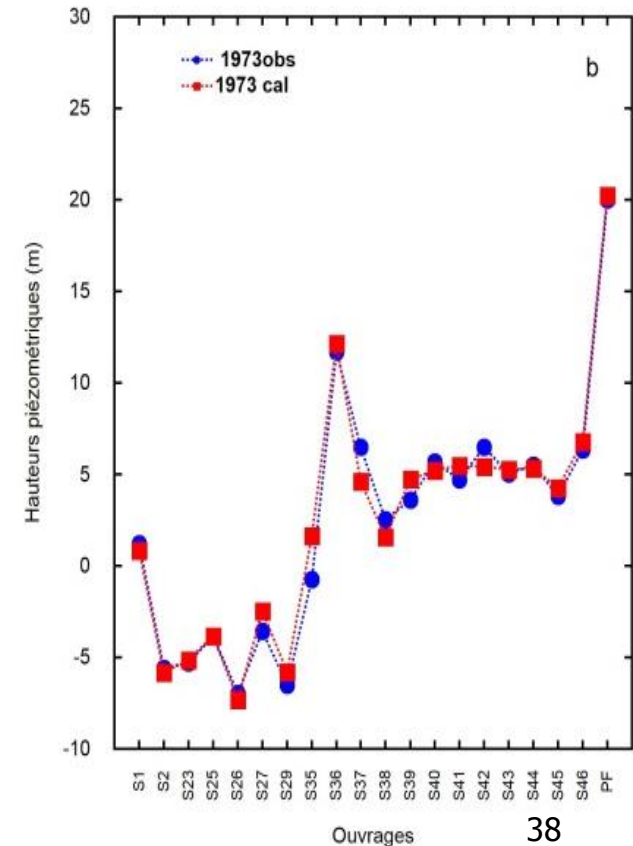
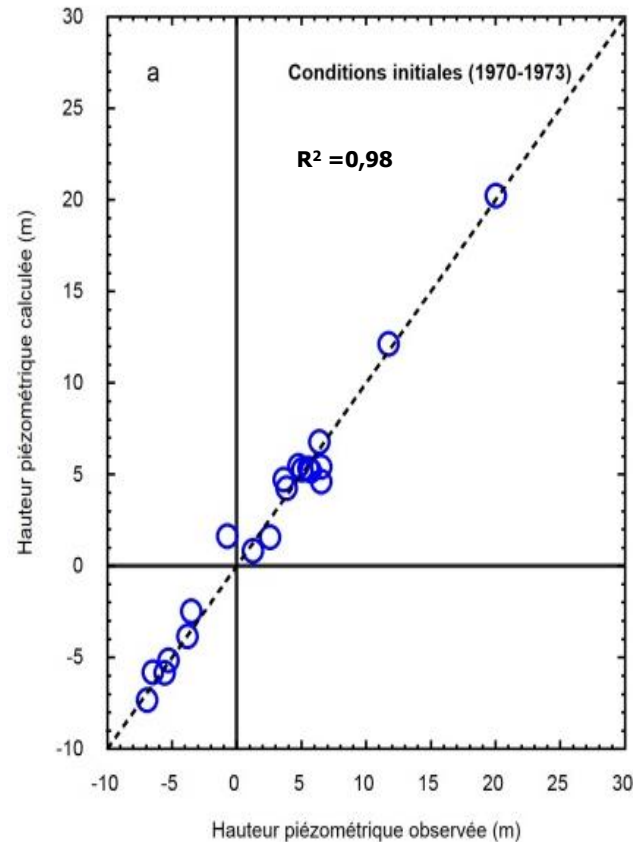


## 5. Modélisation : Simulation des conditions initiales

Paramètres statistiques calculés pour la calibration automatique (PEST) sur la période 1970-1973 (Conditions initiales)

Paramètres statistiques	Valeurs (m)
Erreur moyenne (EM)	-0.1
Erreur moyenne absolue (EMA)	0.6
Erreur quadratique moyenne (RMSE)	0.8

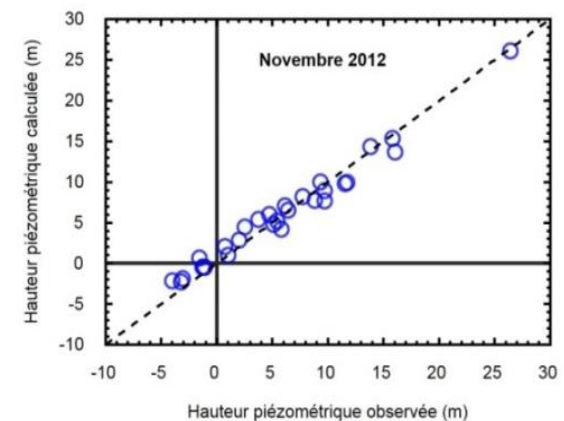
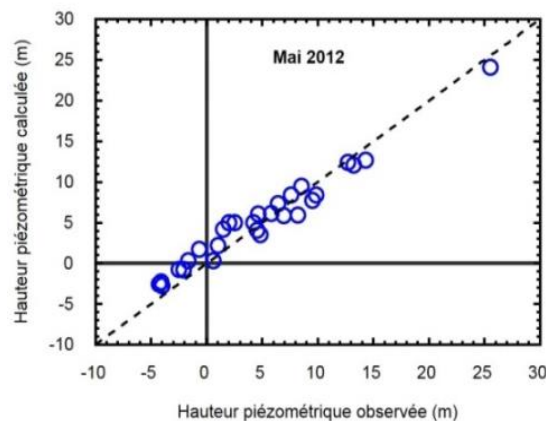
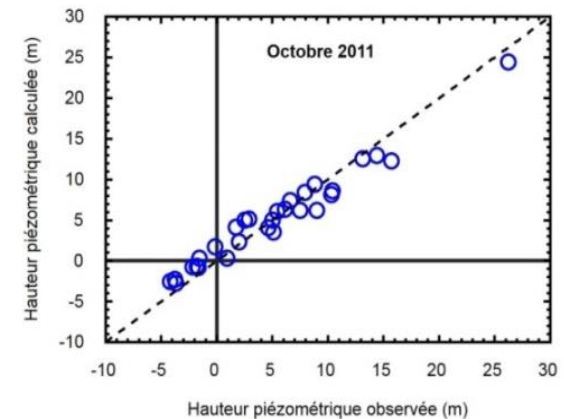
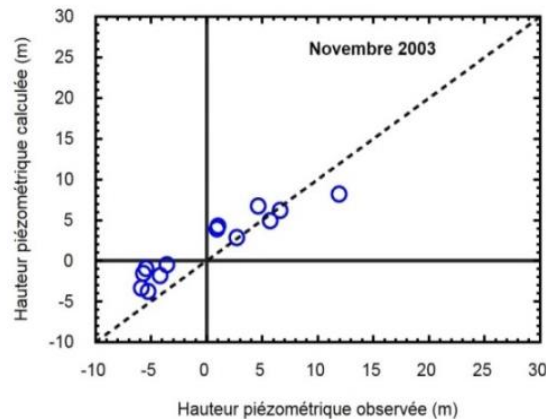
Conductivité hydraulique :  
 $5 \cdot 10^{-6}$  et  $6 \cdot 10^{-3}$  m/s



## 5. Modélisation : Simulation en régime transitoire

Paramètres statistiques calculés pour la validation de la calibration en régime transitoire de la nappe du CT

	Erreur moyenne (EM)	Erreur moyenne absolue (EMA)	Erreur quadratique moyenne (RMSE)
Novembre 2003	-1.7	2.5	2.8
Octobre 2011	0.2	1.4	1.6
Mai 2012	-0.6	1.4	1.6
Novembre 2012	-0.2	1.1	1.2



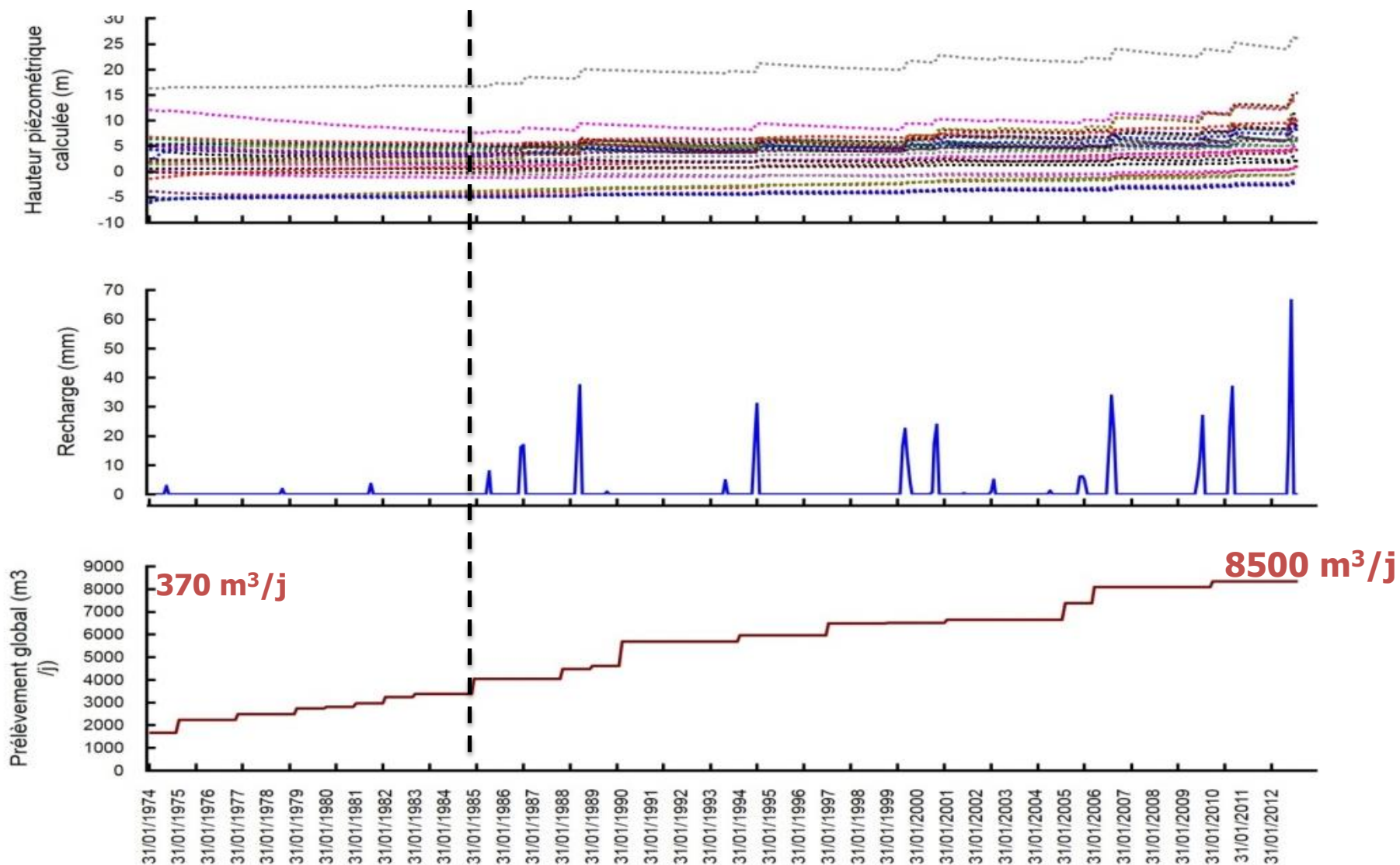
Conductivité hydraulique:

$1.10^{-6}$  à  $9.10^{-4}$  m/s

Porosité de drainage:

5 % à 20 %.

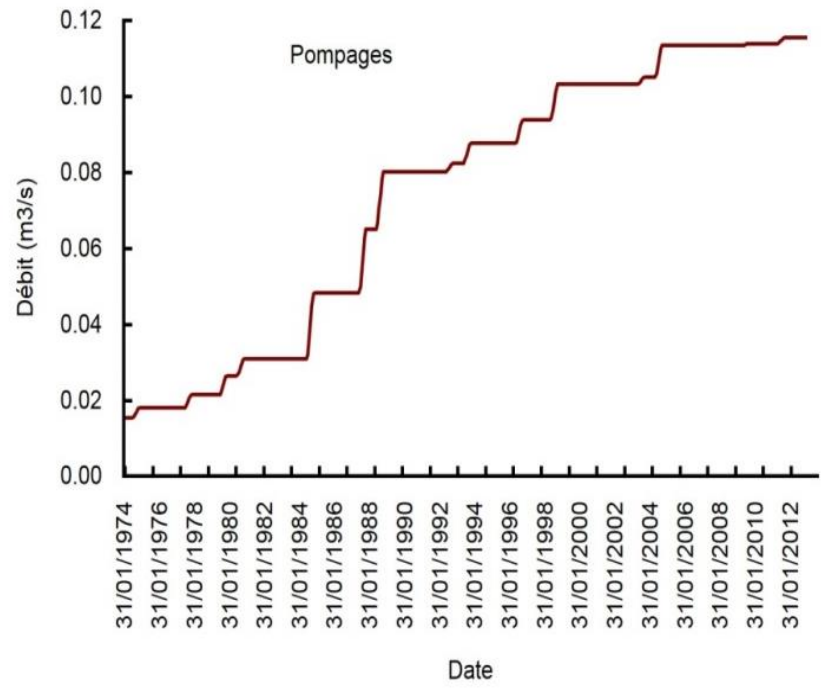
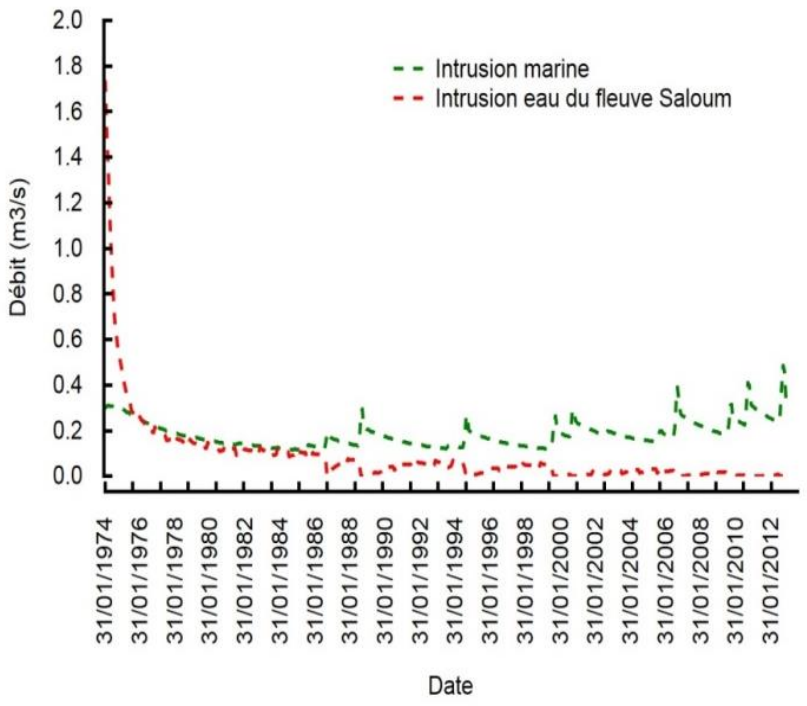
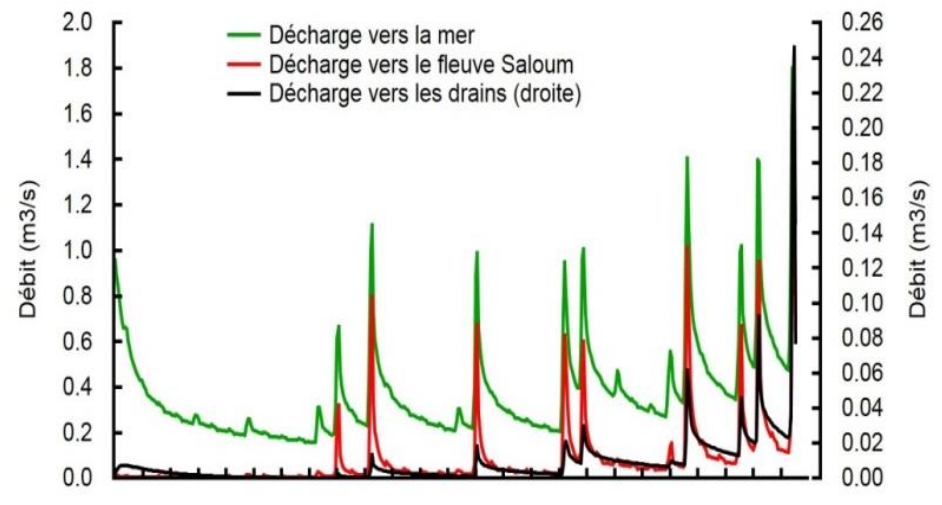
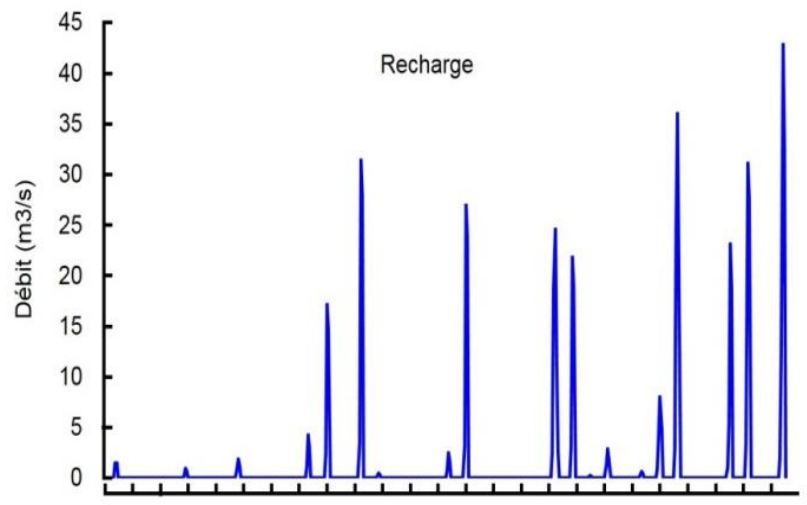
## 5. Modélisation : Simulation en régime transitoire



Évolution générale de la piézométrie de la nappe du CT calculée au niveau des points d'observation, de la recharge et des pompages pour la période de régime transitoire 1974-2012

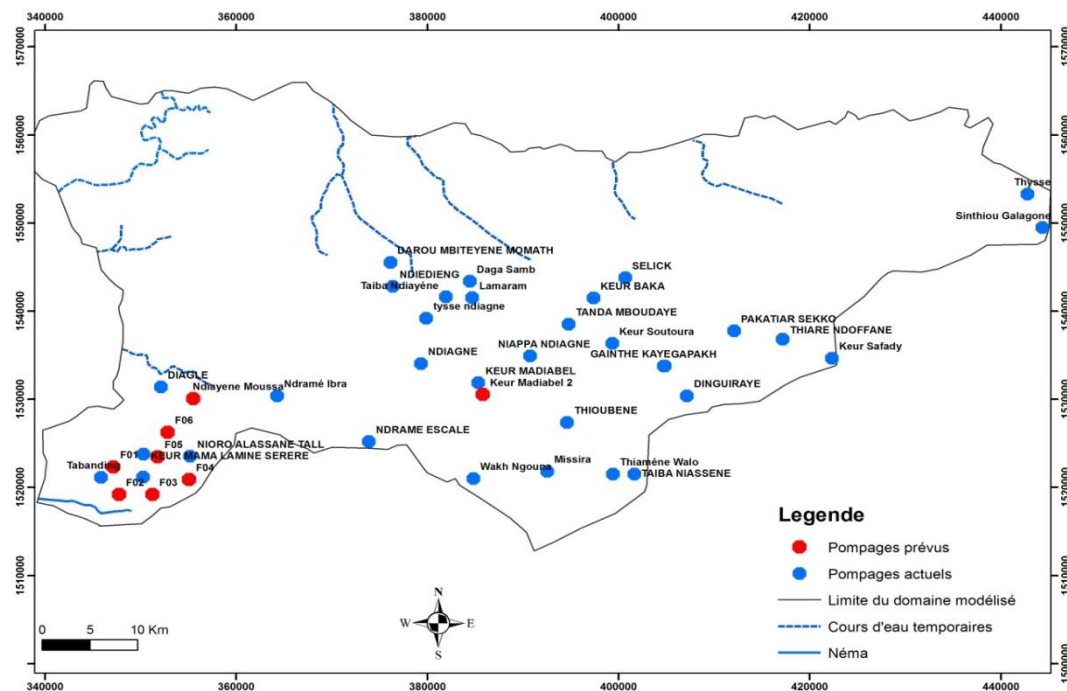
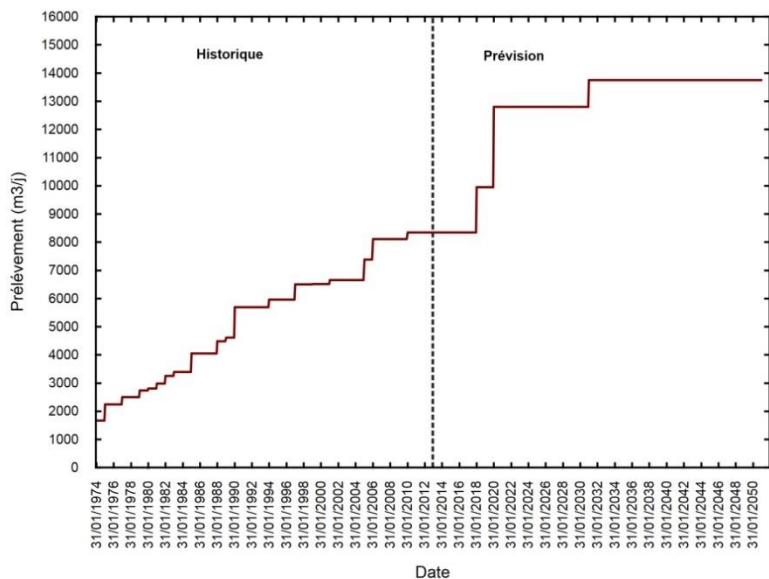


# 5. Modélisation : Simulation en régime transitoire

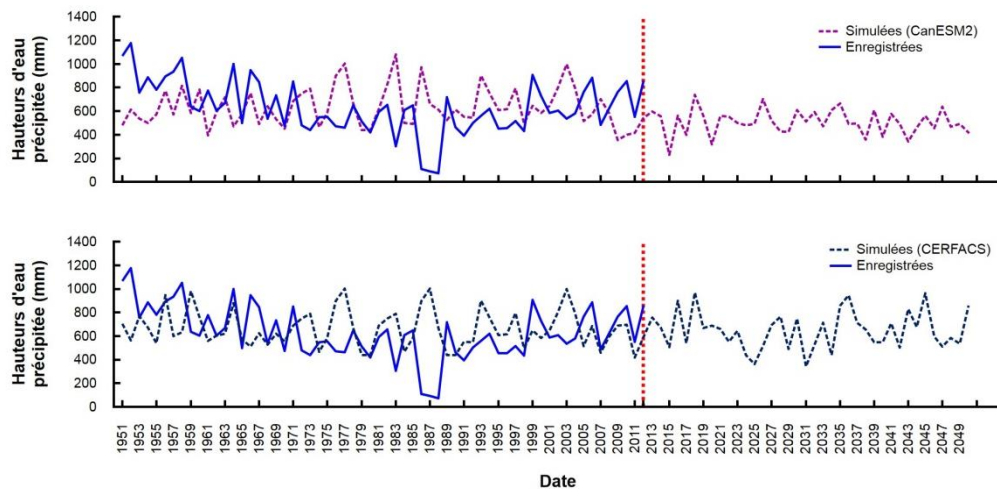


# 5. Modélisation : Simulations prédictives

## Augmentation des pompages



## Scénarios climatiques



## Scénarios climatiques du CORDEX

Coordinated Regional climate Downscaling Experiment (Giorgi *et al.*, 2009)

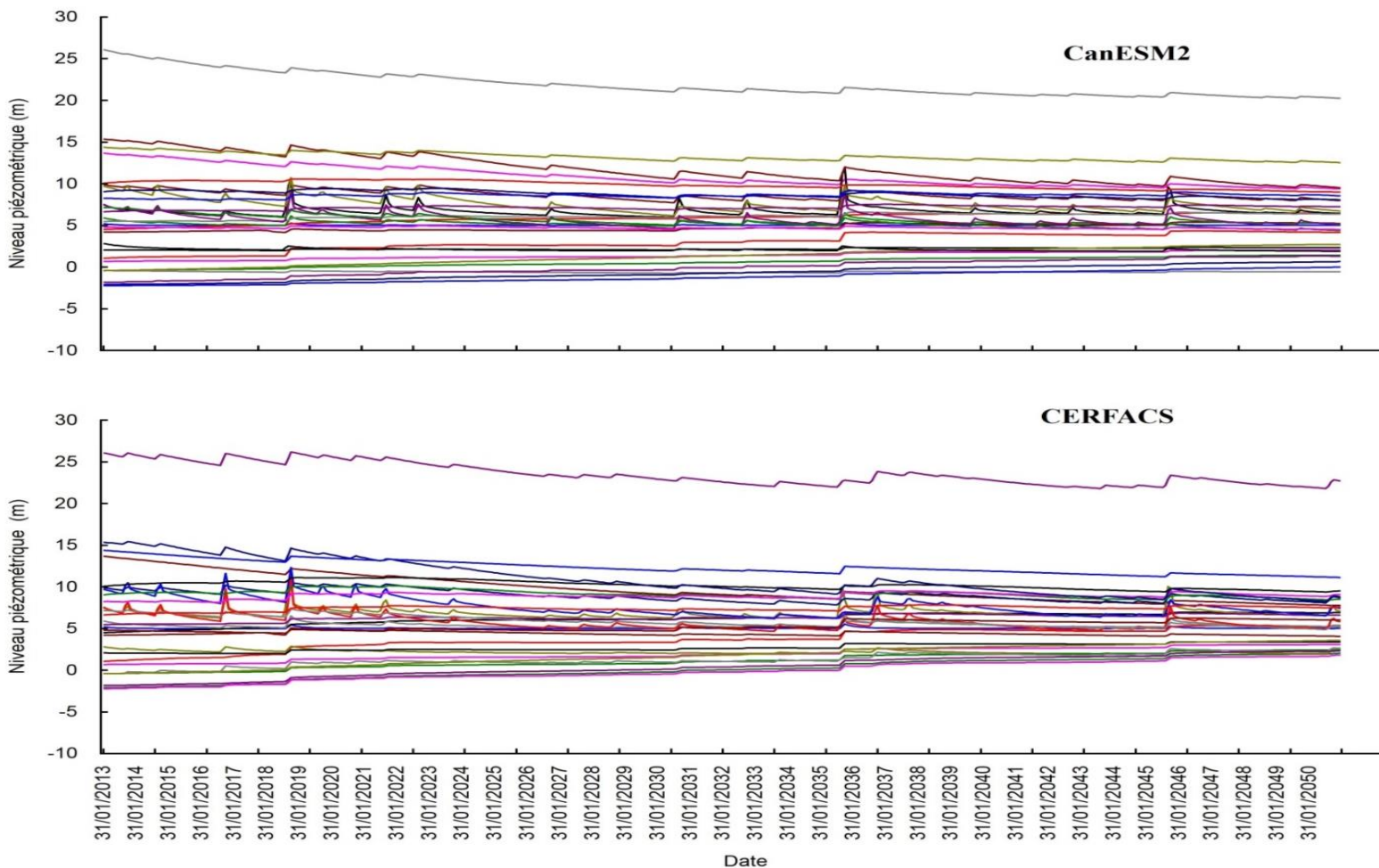
Centre Canadien de la modélisation et de l'analyse du climat (CanESM2)

Centre National de Recherches

Météorologiques (CERFACS)

## 5. Modélisation : Simulations prédictives

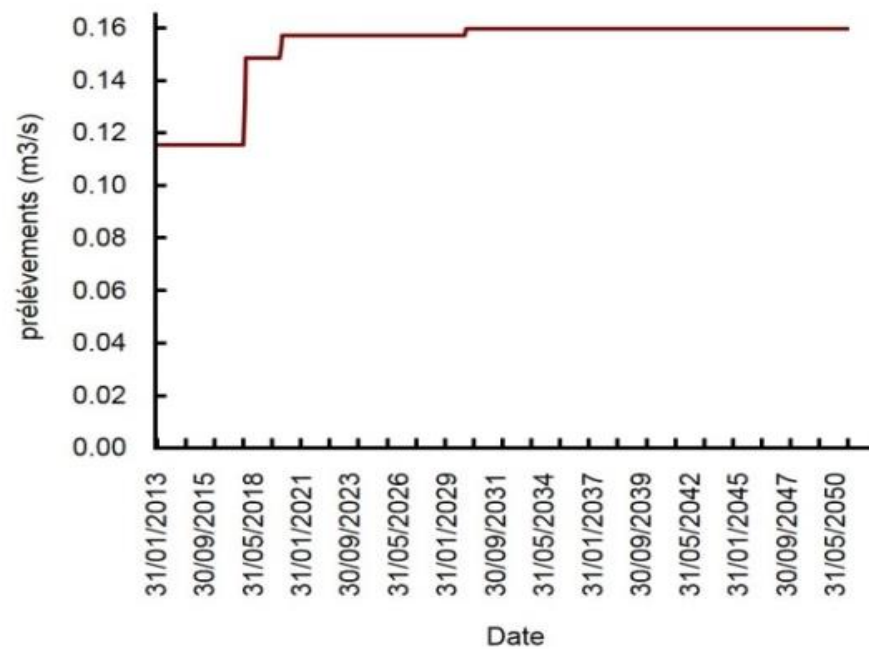
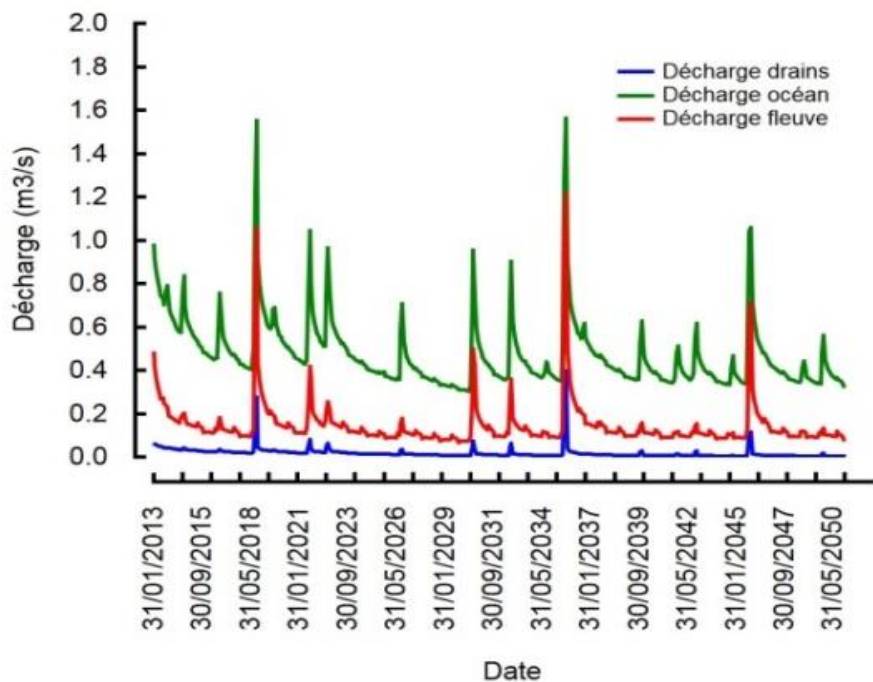
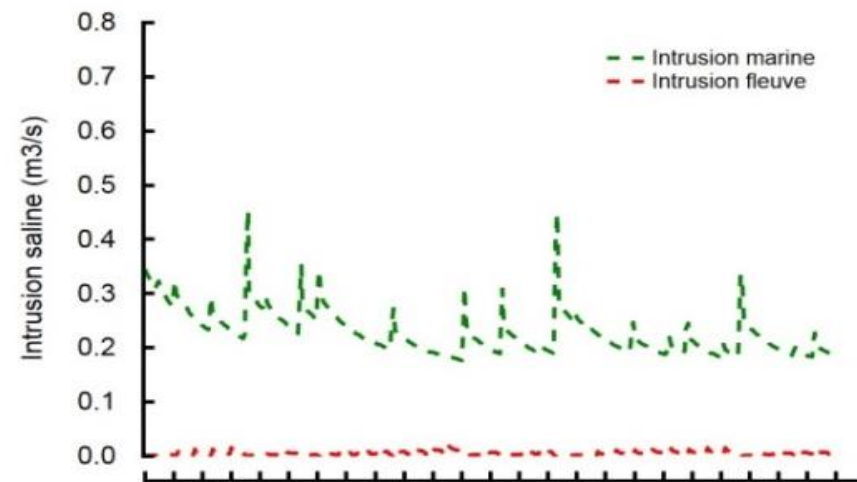
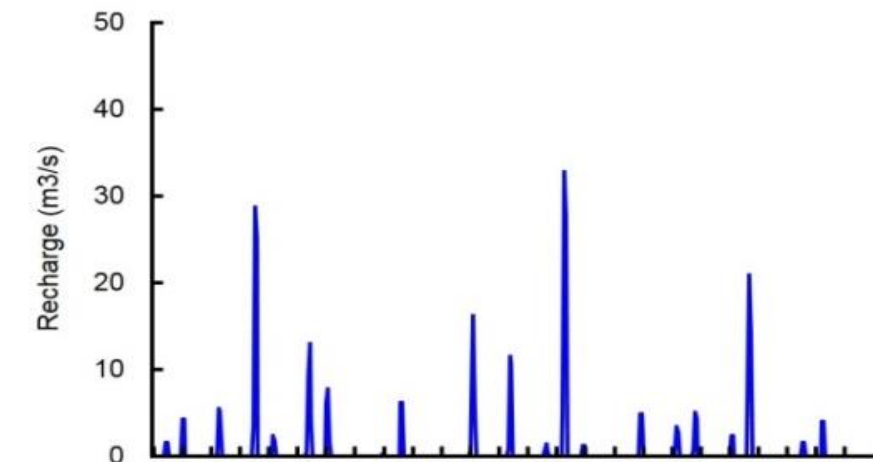
### ☐ Impact des changements climatiques couplés à une augmentation des pompages



baisse de la hauteur piézométrique (0.2 et 4.6 m (CanESM2) et 0.2 et 4 m (CERFACS) ) au Nord, Nord-Ouest et Sud-Ouest.

hausse de la hauteur piézométrique (compris entre 0.1 et 2 m et 0.1 et 2.7m) zone de dépression

## 5. Modélisation : Simulations prédictives



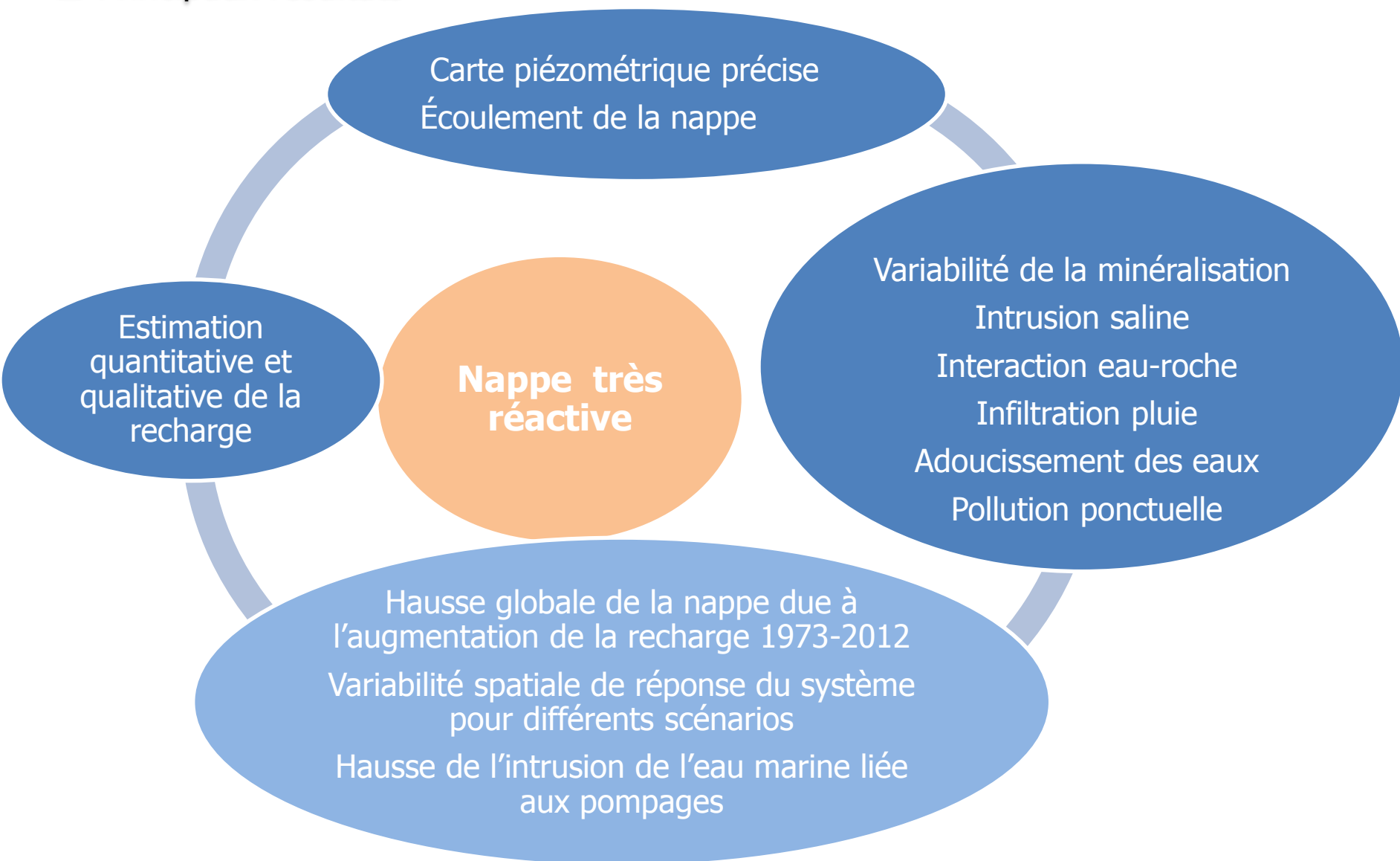
## 5. Modélisation : Simulations prédictives

Simulation	Recharge	Intrusion marine	Intrusion fleuve	Pompage	Drains	Décharge Océan	Décharge Fleuve
Transitoire 2012	1.2	0.18	0.08	-0.07	-0.008	-0.37	-0.18
horizon 2050 (CERFACS)	1.01	<b>0.21</b>	<b>0.09</b>	-0.15	<b>-0.003</b>	-0.28	-0.14
horizon 2050 (CanESM2)	0.7	<b>0.22</b>	<b>0.09</b>	-0.15	<b>-0.002</b>	-0.27	-0.14

- Augmentation de l'intrusion saline (marine et fluviale)
- Baisse de la décharge vers la mer et les drains (Néma localisé au niveau de cette nouvelle zone de captage)

## 6. Conclusions

### ❑ Principaux résultats



## 6. Conclusions

---

### Recommandations

- ❑ Suivi régulier de la nappe
- ❑ Contrôle des rabattements de la nappe dans le secteur Sud-Ouest (champ captant pour les transferts vers les îles du Saloum)

### Perspectives

- ❑ Une amélioration du travail de modélisation
- ❑ Une évaluation du comportement de la zone de contact eau douce/eau salée par simulation de transfert de solutés
- ❑ Une étude isotopique des eaux de pluie, des profils de zone non saturée et de la nappe : dater les eaux et mieux valider les zones de recharge potentielle
- ❑ Une extension de l'étude sur tout le bassin du Saloum : renforcer l'état de la connaissance dans ce système aquifère qui participerait à répondre aux besoins croissants en eau des populations

MERCI

DIEUREUDIEUF

