

**Evolution des remontées du front
des 1000 μ S/cm sur les fleuves
Mana et Maroni – juin à décembre
2011**

Rapport final
BRGM/RP-60622-FR
Décembre 2011

BIBLIOTHEQUE CENTRALE
BRGM - BUREAU DE RECHERCHES GEOLOGIQUES & MINIERES

Evolution des remontées du front des 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sur les fleuves Mana et Maroni – juin à décembre 2011

Rapport final

BRGM/RP-60622-FR

Décembre 2011

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2011 PSP11GUY21

D. Radoux

Avec la collaboration de

B. Joseph

Vérificateur :

Nom : Parizot Manuel

Date : 15 / 12 / 11



Approbateur :

Nom : Lecomte Paul

Date : 15 décembre 2011



En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

Mots clés : Conductivité électrique, front salé, saison sèche, débit, marée, modélisation, Maroni, Mana

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : D. Radoux – Evolution des remontées du front des 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sur les fleuves Mana et Maroni – juin à décembre 2011 – BRGM/RP-60622-FR. 65p., 13 fig., 3tab, 3 ann.

Synthèse

Le suivi de la remontée du front de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sur les fleuves Mana et Maroni pour l'année 2011 s'inscrit dans le cadre de la protection des captages d'eau installés dans ces fleuves, et destinés à l'alimentation en eau potable des bourgs de Mana et Saint Laurent du Maroni.

En effet, lors de la conjonction d'évènements singuliers (forts coefficients de marée, étiages prononcés, etc.) il a été constaté (sur la Comté et le Maroni en 2009) que les captages d'eau en rivière, localisés sur la frange littorale, sont potentiellement menacés par des intrusions d'eau salines. Les ouvrages deviennent alors impropres à la production d'eau destinée à la consommation humaine.

En 2011, la Direction de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement (DEAL) de Guyane a missionné le Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM) pour réaliser des campagnes ponctuelles de suivi de remontée du front salé sur les fleuves Mana et Maroni. Durant cette période, le front de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (valeur limite de conductivité électrique pour les eaux destinées à la consommation humaine) a été localisé au maximum à 13,2 km à l'aval du captage dans la Mana et à 5,45 km à l'aval du captage dans le Maroni.

L'influence, sur l'évolution de la position du front salé, de différentes variables (débit du fleuve, hauteur de marée, accumulation d'eaux salées dans le système hydrographique au fur et à mesure de la saison sèche) a été mise en avant à des degrés divers. Le débit du fleuve apparaît comme la variable prépondérante dans l'évolution de la position du front salé.

A l'aide des trois variables précitées, une modélisation de la distance du front salé par rapport à la prise d'eau a été proposée. Il a été nécessaire pour affiner la modélisation de se concentrer sur une plage de débit assez restreinte qui correspond à des situations d'étiage. Une approche réfléchie de cette modélisation a permis de proposer un modèle relativement précis pour une gamme de débits inférieurs à 600 m^3/s . Cependant ce modèle semble encore peu robuste au vu du peu de données disponibles actuellement concernant la remontée du front salé.

Il est à noter que les essais de modélisation du présent rapport ne sont pas inscrits au cahier des charges de cette étude. Ils permettent cependant de jeter les bases d'une réflexion plus précise à mener dans le futur à condition de poursuivre l'acquisition de données essentielles à la modélisation.

Sommaire

1. Contexte	9
1.1. CADRE DU PROJET	9
1.2. REFERENCE QUALITE.....	10
1.3. LOCALISATION DE LA PRISE D'EAU SUR LA MANA.....	10
1.4. LOCALISATION DE LA PRISE D'EAU SUR LE MARONI	11
2. Campagnes de surveillance réalisées en 2011	13
2.1. METHODOLOGIE.....	13
2.2. RESULTATS	14
2.3. INTERPRETATIONS.....	15
2.3.1. La Mana.....	15
2.3.2. Le Maroni.....	15
3. Modélisation de la position du front salé sur le fleuve Maroni	17
3.1. INTRODUCTION.....	17
3.2. PRESENTATION DES RESULTATS ET INTERPRETATION	17
3.3. ETUDE DE CORRELATIONS	21
3.3.1. Distance - Débit	21
3.3.2. Distance - Temps écoulé depuis la première mesure	22
3.3.3. Distance - Marée.....	24
3.4. MODELISATION DE LA DISTANCE DU FRONT SALE PAR RAPPORT A LA PRISE D'EAU.....	25
3.4.1. Modèle 1 « Distance-Débit »	25
3.4.2. Modèle 2 « Distance-Débit-Temps-Marée »	27
3.4.3. Modèle 3 « par saison »	28
3.4.4. Modèle 4 « faible débit »	29
4. Conclusions	31

Liste des illustrations

Figure 1 : Localisation de la prise d'eau de Mana (BD Ortho, IGN, 2006).....	10
Figure 2 : Localisation de la prise d'eau de Saint Laurent du Maroni (BD Ortho, IGN, 2006).....	11
Figure 3 : Embarcation mobile du BRGM sur la Mana et appareils de mesure de la conductivité électrique.....	13
Figure 4 : Distance du front salé à la prise d'eau observé pendant les campagnes de mesures 2009 au maximum de sa remontée, hauteurs de marée correspondantes, débits moyens journaliers du Maroni à Langa Tabiki.....	19
Figure 5 : Distance du front salé à la prise d'eau observé pendant les campagnes de mesures 2011 au maximum de sa remontée, hauteurs de marée correspondantes, débits moyens journaliers du Maroni à Langa Tabiki.....	20
Figure 6 : Relation entre les variables "Distance" et "Débit"	21
Figure 7 : Relation entre les variables "Distance" et "Temps"	22
Figure 8 : Relation entre les variables "Distance" et "Temps" avec distinction des années 2009 et 2011	23
Figure 9 : Relation entre les variables "Distance" et "Marée"	24
Figure 10 : Relation entre "Distance" et "Marée" et débits correspondants.....	24
Figure 11 : Régression logarithmique pour les variables "Distance-Débit"	26
Figure 12 : Ecart entre valeurs observées et valeurs modélisées par le modèle 2	27
Figure 13 : Ecart entre valeurs observées et valeurs modélisées par le modèle 3a	28
Figure 14 : Ecart entre valeurs observées et valeurs modélisées par le modèle 3b	29
Figure 15 : Ecart entre valeurs observées et valeurs modélisées par le modèle 4	30

Liste des tableaux

Tableau 1 : Résultats bruts des campagnes de surveillance sur la Mana.....	14
Tableau 2 : Résultats bruts des campagnes de surveillance sur le Maroni.....	14
Tableau 3 : Résultats des campagnes de surveillance 2009 et 2011 et données correspondantes.....	18

Liste des annexes

Annexe 1 : Fiches récapitulatives de campagnes de mesures de la conductivité électrique en 2011– La Mana.....	33
Annexe 2 : Fiches récapitulatives de campagnes de mesures de la conductivité électrique en 2011– Le Maroni.....	43
Annexe 3 : Données détaillées sur les modèles proposés	53

1. Contexte

1.1. CADRE DU PROJET

Les bourgs de Mana et Saint Laurent du Maroni sont respectivement alimentés en eau potable par des captages d'eau dans les fleuves Mana et Maroni. Ces prises d'eau situées sur la frange littorale, à environ 30 km de l'embouchure des fleuves, peuvent être soumises, à des degrés divers et selon les années, à des intrusions salines depuis l'océan.

La remontée de ses intrusions salines est contrôlée par la hauteur des marées mais aussi vraisemblablement par les conditions météorologiques. Ainsi c'est en saison sèche, lors des périodes d'étiage des fleuves, que les fronts salés vont remonter le plus en amont.

La conjonction des éléments peut entraîner une remontée exceptionnelle du front salé qui constitue alors une menace de contamination des captages d'eau potable.

Le SDAGE de la Guyane 2010-2015 inscrit comme première orientation fondamentale l'alimentation en eau potable avec « l'amélioration de la connaissance du point de salure ». Plusieurs autres aspects du SDAGE s'inscrivent dans cet axe comme « la connaissance des dynamiques fluviales » ou encore « la sécurisation de l'AEP en mettant en place des dispositifs de sécurité en cas de pollution majeure ».

C'est dans ce contexte que la Direction de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement (DEAL) a missionné le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) pour effectuer un suivi de l'évolution du front salé au cours de l'année 2011 et notamment en saison sèche sur les fleuves Mana et Maroni.

Ce suivi a consisté en la réalisation de campagnes de mesures de la conductivité électrique des fleuves selon le calendrier suivant :

- 2 campagnes réalisées en juin et juillet 2011 (saison des pluies)
- 7 campagnes réalisées d'août à décembre 2011 (saison sèche)

Il faut souligner que la dernière campagne de mesure, effectuée le 19 et 20 décembre 2011, n'est pas prise en compte dans ce rapport ;

Le projet avait pour objectifs de présenter et d'interpréter les résultats obtenus lors de ces campagnes, mais aussi de proposer un modèle mathématique (partie effectuée hors du cahier des charges), permettant de corréler l'évolution du front salé avec les débits des fleuves et la hauteur des marées. Un autre phénomène, non mesurable à l'heure actuelle, a également été observé : l'accumulation de sel dans les réseaux hydrographiques estuariens au fur et à mesure de l'avancement de la saison sèche. Cela se traduit par le fait que pour une même hauteur de marée et un même débit du fleuve, le front salé progressera d'autant plus vite vers l'amont que l'on avance dans la saison sèche.

1.2. REFERENCE QUALITE

L'annexe III de l'arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine, fixe, pour les eaux douces superficielles destinées à la consommation humaine, une limite de qualité pour le paramètre conductivité de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 20 °C et 1100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25 °C. Il s'agit de valeurs guides et non de valeurs limites impératives.

La conductivité électrique de l'eau représente sa capacité à conduire le courant électrique. Elle est directement proportionnelle à la quantité d'ions ou sels minéraux dissous dans cette eau. La conductivité moyenne des eaux de surface en Guyane est d'environ 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ce qui traduit d'une faible minéralisation. La conductivité électrique moyenne de l'eau de mer à la surface du globe est de 35500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ce qui témoigne d'une forte concentration en ions (Na^+ , Cl^-) dissous.

Les eaux douces et marines vont alors facilement se différencier par cette mesure.

1.3. LOCALISATION DE LA PRISE D'EAU SUR LA MANA

L'alimentation en eau potable de la commune de Mana est assurée par un captage dans le fleuve Mana situé à environ 26 km de son embouchure.

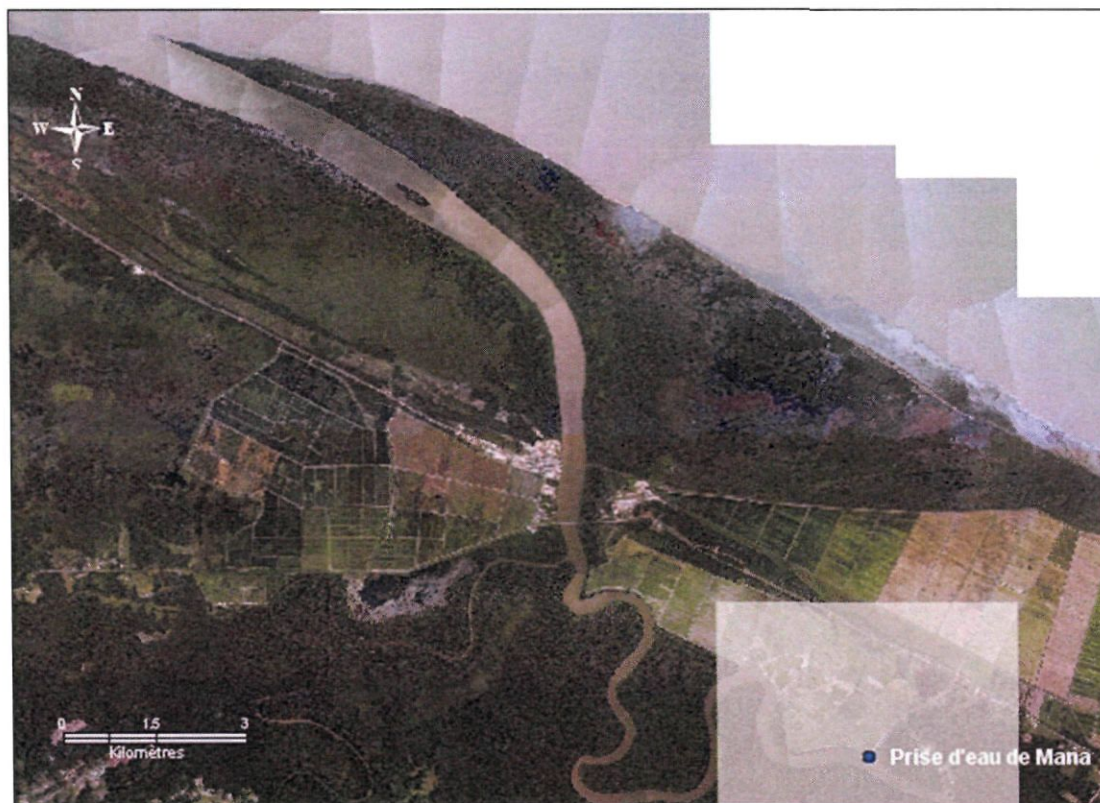


Figure 1 : Localisation de la prise d'eau de Mana (BD Ortho, IGN, 2006)

1.4. LOCALISATION DE LA PRISE D'EAU SUR LE MARONI

Le bourg de Saint Laurent du Maroni est alimenté par une prise d'eau dans le fleuve Maroni, au droit de l'île Saint Louis, à environ 32 km de l'embouchure du fleuve.



Figure 2 : Localisation de la prise d'eau de Saint Laurent du Maroni (BD Ortho, IGN, 2006)

2. Campagnes de surveillance réalisées en 2011

2.1. METHODOLOGIE

En 2011, 9 campagnes de mesure de la conductivité électrique ont été réalisées sur les fleuves Mana et Maroni (8 sont interprétées ici, la neuvième se fera les 20 et 21 décembre). Ces opérations se sont déroulées de juin à décembre 2011, soit principalement pendant la saison sèche.

Le but de ces manipulations est de repérer le maximum de remontée du front de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les campagnes de surveillance sont donc programmées, dans la mesure du possible, lors des plus fortes marées, de façon à observer le phénomène en condition défavorable.

Une campagne de mesures se déroule en effectuant un premier repérage du front salé avant la marée haute (la référence étant la marée aux Iles du Salut). Ensuite, un suivi de la remontée du front de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ est réalisé jusqu'à inversion de la tendance, c'est-à-dire jusqu'à que le front redescende vers l'aval. Ainsi la position du front salé, la plus en amont est repérée et géoréférencée à l'aide d'un GPS. Les mesures se font à l'aide d'une embarcation mobile (coque aluminium) et de deux appareils de mesures (Sonde Multiparamètres HANNA HI9828 et WTW Cond340i) (Figure 3).

Les mesures sont réalisées en surface et dans l'axe du fleuve, là où les conductivités sont les plus représentatives de l'ensemble de la section. Il faut noter que la remontée du front salé peut être relativement hétérogène sur toute la largeur du fleuve. En effet la largeur importante (jusqu'à 4 km pour le Maroni) et les courants parfois très localisés influent sur une progression du front salé plus ou moins marquée selon les endroits.

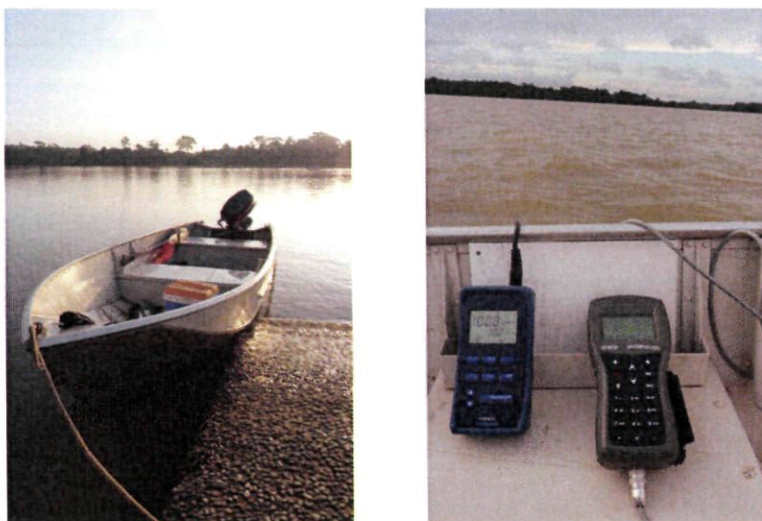


Figure 3 : Embarcation mobile du BRGM sur la Mana et appareils de mesure de la conductivité électrique

2.2. RESULTATS

L'ensemble des résultats obtenus au cours des 8 campagnes de mesures de l'année 2011 (rappel : 1 campagne n'est pas prise en compte car faite fin décembre) est illustré par des fiches reportées en Annexe 1 pour la Mana et en Annexe 2 pour le Maroni. Ces fiches récapitulent pour chaque campagne la position la plus en amont du front de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, l'horaire et la hauteur des marées aux Iles du Salut, l'heure du maximum de remontée du front salé ainsi que sa distance par rapport à la prise d'eau. Les tableaux ci-dessous récapitulent toutes ces données.

Date	Hauteur de la marée (m)	Heure de la marée haute aux Iles du Salut	Heure de remontée maximum du front de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Distance à la prise d'eau (km)
06/06/2011	3.10	07h37	09h10	25.5
11/07/2011	2.70	13h57	14h30	23.8
16/08/2011	3.10	06h14	08h10	18.6
27/09/2011	3.50	16h41	18h28	13.5
13/10/2011	2.95	05h20	06h40	14.9
04/11/2011	2.66	12h29	12h42	16
25/11/2011	3.25	04h34	06h13	15.9
09/12/2011	2.8	04h02	05h50	13.2

Tableau 1 : Résultats bruts des campagnes de surveillance sur la Mana

Date	Hauteur de la marée (m)	Heure de la marée haute aux Iles du Salut	Heure de remontée maximum du front de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Distance à la prise d'eau (km)
07/06/2011	3.00	08h32	09h47	26.8
12/07/2011	2.80	14h56	16h09	21.7
17/08/2011	3.00	06h46	08h00	17.5
26/09/2011	3.35	15h57	17h28	14.2
13/10/2011	3.05	17h28	19h16	9.1
03/11/2011	2.60	11h25	12h40	15.7
24/11/2011	3.50	15h58	18h32	6.8
08/12/2011	2.95	15h32	18h11	5.45

Tableau 2 : Résultats bruts des campagnes de surveillance sur le Maroni

2.3. INTERPRETATIONS

2.3.1. La Mana

Sur le fleuve Mana, le front des 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ est remonté au maximum, sur la période de juin à décembre 2011, à 13,2 km en aval de la prise d'eau.

A environ 1 km en amont de cet endroit, il avait été mesuré par le BRGM en 2007, une valeur de 4300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour la conductivité électrique de l'eau. Cependant l'évolution de la méthodologie entre ces deux campagnes de mesures réalisées sur la Mana ne nous permet pas de comparer les résultats de façon pertinente.

Il n'existe pas à ce jour de station limnimétrique en fonctionnement sur la Mana. De plus la faible densité des stations pluviométriques sur l'ensemble du bassin versant de ce fleuve rend difficilement exploitable la donnée « précipitation ».

Au vu du manque de données et de connaissance sur la dynamique de remontée du front salé dans le fleuve Mana, une interprétation précise de la position du front de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ n'est pas envisageable.

Les campagnes de surveillance sur l'année 2011 ont servi à acquérir des données sur la remontée du front salé dans ce fleuve et à se rendre compte qu'au plus fort de la saison sèche, lors d'une année qui n'apparaît pas comme extrême au niveau météorologique, le front de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ se situe largement en aval de la prise d'eau. Cela laisse à penser qu'en dehors d'une situation de sécheresse extrême la prise d'eau sur le fleuve Mana n'est pas menacée par les intrusions d'eau salines.

2.3.2. Le Maroni

Sur le fleuve Maroni, le front des 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ est remonté au maximum, sur la période de juin à décembre 2011, à 5,45 km en aval de la prise d'eau.

La remontée du front salé sur ce fleuve a fait l'objet d'une importante campagne de mesure réalisée durant la saison sèche 2009. Cette année-là a été considérée comme particulièrement sèche avec, ponctuellement, des remontées du front de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sur le Maroni en amont de la prise d'eau.

Déjà en 2009, on observe que la position du front salé est largement conditionnée par le débit du fleuve, donnée issue de la station limnimétrique de Langa Tabiki. Cette station de mesure du débit est située en amont du village d'Apatou à environ 100 km de l'embouchure du fleuve.

Dans la partie suivante nous étudierons les corrélations éventuelles entre la position du front salé par rapport à la prise d'eau et différents paramètres tels que le débit du fleuve ou encore la hauteur des marées. Un traitement mathématique permettra ensuite de mettre en avant différentes équations servant à calculer, plus ou moins approximativement, la position du front salé suivant ces paramètres.

3. Modélisation de la position du front salé sur le fleuve Maroni

3.1. INTRODUCTION

De façon générale, la marée provoque dans les estuaires et la partie côtière des fleuves, un mouvement de va-et-vient appelé onde de marée. Par ce phénomène, l'eau de mer pénètre le cours du fleuve à marée montante, repoussant ainsi l'eau douce vers l'amont. L'importance de la remontée des eaux salines dépend alors de plusieurs paramètres tels que le coefficient de marée (ici on parlera de hauteur de marée), le débit du fleuve, les caractéristiques géométriques de l'estuaire, la pente du lit submergé, etc.

Au vu des données disponibles, nous étudierons principalement l'influence du débit du fleuve et de la hauteur de marée sur la remontée des eaux salées uniquement dans l'estuaire du Maroni.

3.2. PRESENTATION DES RESULTATS ET INTERPRETATION

Les données et les résultats qui serviront à la suite de l'étude sont récapitulés dans le Tableau 3.

Il s'agit des résultats concernant la position du front salé au maximum de sa remontée et des données de débit et de hauteur de marée correspondantes lors des campagnes de surveillance 2009 et 2011.

Les données de hauteur de marée correspondent au marégraphe des Iles du Salut et sont issues du site internet du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM). Les données de débits correspondent à des débits moyens journaliers mesurés à la station hydrométrique de Langa Tabiki gérée par la DEAL de Guyane.

Date	Hauteur marée (m)	Distance entre le front de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au maximum de sa remontée et la prise d'eau (km)	Débit à Langa Tabiki (m^3/s)
09/09/2009	2.84	7.7	489.5
16/09/2009	3.05	6	417.4
22/09/2009	2.97	6.1	350.3
06/10/2009	3.05	1.7	197.5
15/10/2009	3.07	3.22	153.4
21/10/2009	2.87	1.72	164.7
28/10/2009	2.58	0.9	128.5
04/11/2009	3.07	0.55	120.1
13/11/2009	3.11	0.88	147.7
17/11/2009	3.22	-0.87	113.5
26/11/2009	2.61	-0.8	100.3
03/12/2009	3.09	-2.1	100.5
08/12/2009	2.91	-1.7	110.3
16/12/2009	2.81	7.3	565.8
07/06/2011	3	26.8	5796
12/07/2011	2.8	21.7	2350
17/08/2011	3	17.75	1682
26/09/2011	3.35	14.1	1197.2
13/10/2011	3.05	9.9	712.3
04/11/2011	2.66	24.6	947.3
24/11/2011	3.5	6.8	579
08/12/2011	2.95	5.45	429.5

Tableau 3 : Résultats des campagnes de surveillance 2009 et 2011 et données correspondantes

Dans un premier temps, les graphiques présentés en Figure 4 et Figure 5 permettent d'étudier les relations entre la distance du front salé à la prise d'eau ainsi que les autres paramètres (débit, hauteur de marée).

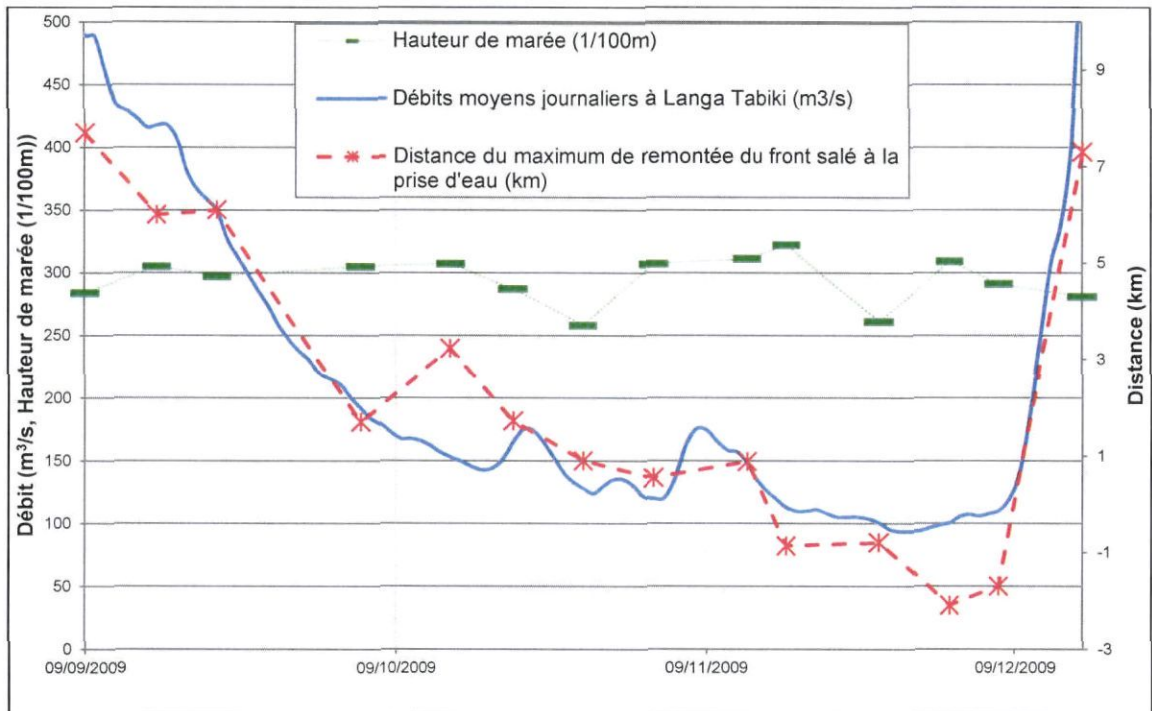


Figure 4 : Distance du front salé à la prise d'eau observé pendant les campagnes de mesures 2009 au maximum de sa remontée, hauteurs de marée correspondantes, débits moyens journaliers du Maroni à Langa Tabiki

La relation entre le débit et la distance du front salé à la prise d'eau est clairement mise en évidence à travers la Figure 4. On constate que plus de débit du fleuve Maroni est faible, plus la distance entre le front salé et la prise d'eau diminue et inversement.

L'influence de la hauteur de marée sur la position du front salé est quant à elle moins significative. L'influence du débit du fleuve sur la position du front salé apparaît alors prépondérante par rapport à celle de la hauteur de marée.

La mesure du 15 octobre 2009 ne paraît pas suivre la tendance générale. En effet, le front de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ entame une redescente vers l'aval alors que le débit diminue et la hauteur de marée reste constante. Cette « anomalie » pourrait correspondre à une brève augmentation du débit du fleuve uniquement ressentie à l'aval de la station de Langa Tabiki. Par la suite cette mesure sera écartée pour la modélisation.

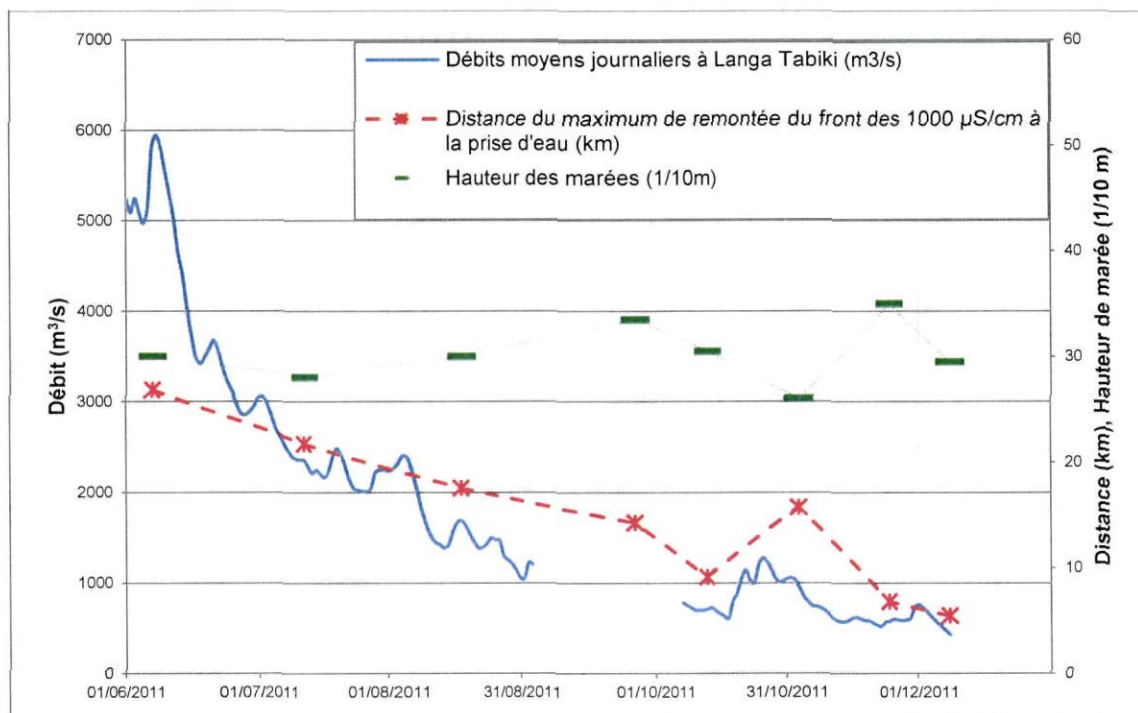


Figure 5 : Distance du front salé à la prise d'eau observé pendant les campagnes de mesures 2011 au maximum de sa remontée, hauteurs de marée correspondantes, débits moyens journaliers du Maroni à Langa Tabiki.

Pour les campagnes réalisées en 2011, l'évolution de la position du front salé semble également étroitement influencée par le débit du fleuve. Il est à noter que la gamme des débits observés en 2011 est beaucoup plus large qu'en 2009 avec des débits maximums d'environ 6000 m^3/s en 2011 contre 500 m^3/s 2009.

On constate que pour une gamme de débit très élevée (supérieure à 2 500 m^3/s), une forte variation de ce paramètre (diminution d'un facteur 2.5) ne se répercute pas avec la même intensité sur la position du front salé. A cette période de l'année ie fin de saison des pluies, le front salé se situe très en aval dans l'estuaire, proche de l'océan. C'est la zone dans laquelle oscille le front salé en saison des pluies et où le paramètre hauteur de marée devient prépondérant vis-à-vis du paramètre débit pour le contrôle de la position du front salé. A l'embouchure, le débit du fleuve, quel qu'il soit, est amorti par l'onde de marée.

La Figure 5 montre également une influence de la hauteur de marée, inversement proportionnelle à la distance entre le front de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et la prise d'eau ; influence cependant moins marquée que celle du débit du fleuve.

3.3. ETUDE DE CORRELATIONS

Les traitements mathématiques présentés par la suite ont pour but de mettre mieux en évidence les relations entre les variables présentées au chapitre précédent.

Seront étudiées ici, les relations entre la distance de remontée maximale du front de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ par rapport à la prise d'eau (notée « Distance ») et :

- le débit moyen journalier du fleuve mesuré à Langa Tabiki (noté « Débit ») ;
- la hauteur des marées aux Iles du Salut (notée « Marée ») ;
- le temps écoulé depuis la première mesure (noté « Temps », le 07 juin étant la date de référence pour les deux années). Ce paramètre a pour intérêt de chercher à représenter le phénomène d'accumulation d'eau salée dans les réseaux hydrographiques estuariens. En effet, plus la saison sèche avance dans le temps, plus le front salé progresse vers l'amont et plus le stock d'eau salée piégé dans le réseau hydrographique des affluents entre deux cycles de marée augmente.

3.3.1. Distance - Débit

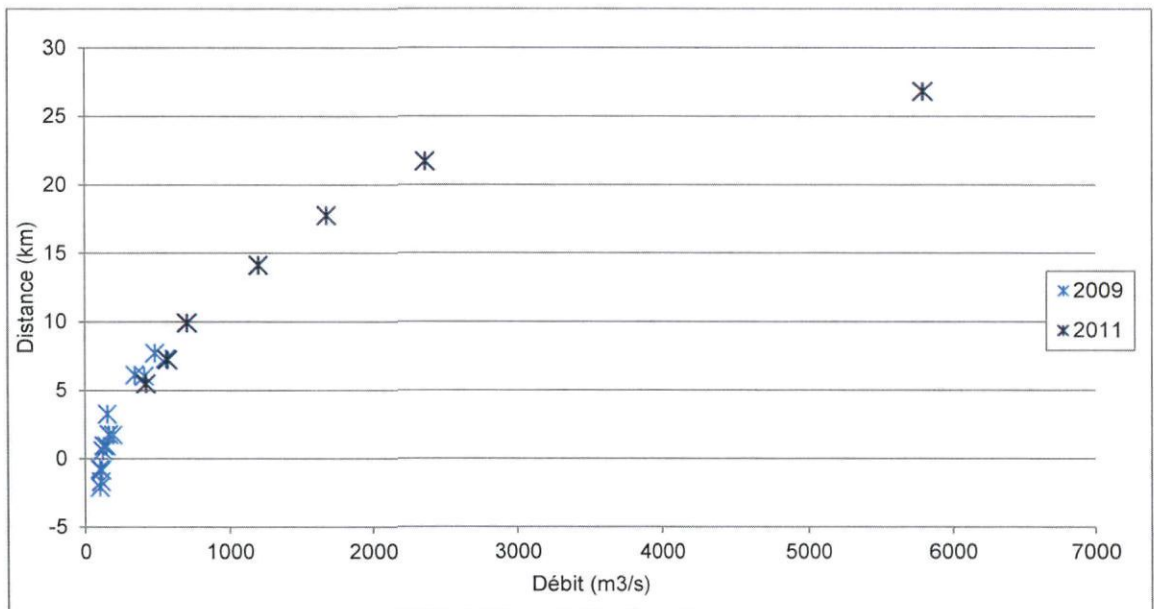


Figure 6 : Relation entre les variables "Distance" et "Débit"

La Figure 6, met en évidence une relation de type logarithmique entre la « Distance » et le « Débit ». Le coefficient de détermination (R^2) entre les deux variables est de 0,96 pour l'ensemble des données.

3.3.2. Distance - Temps écoulé depuis la première mesure

Pour les deux années de mesure la date de référence prise en compte est le 07 juin qui est la date de la première mesure de l'année 2011. En 2009 les mesures ont commencé seulement le 09 septembre.

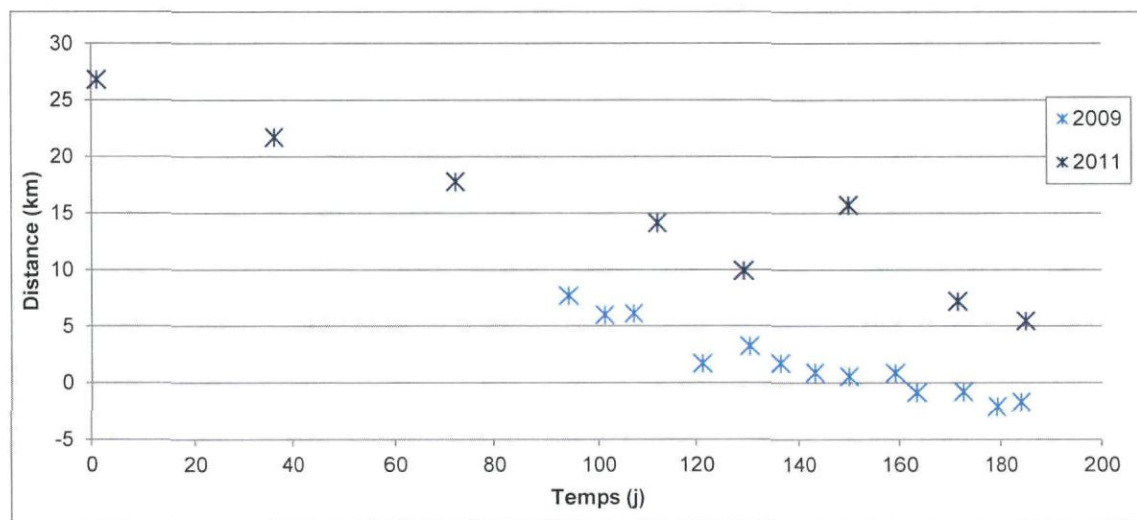


Figure 7 : Relation entre les variables "Distance" et "Temps"

La Figure 7 montre une relation linéaire et inversement proportionnelle entre les variables « Distance » et « Temps ». A l'étude de ce graphique on observe un relativement bon alignement des données en fonction de l'année de mesure. Les données de 2009 et de 2011 s'alignent bien entre elles mais avec un décalage d'ordonnée entre les deux

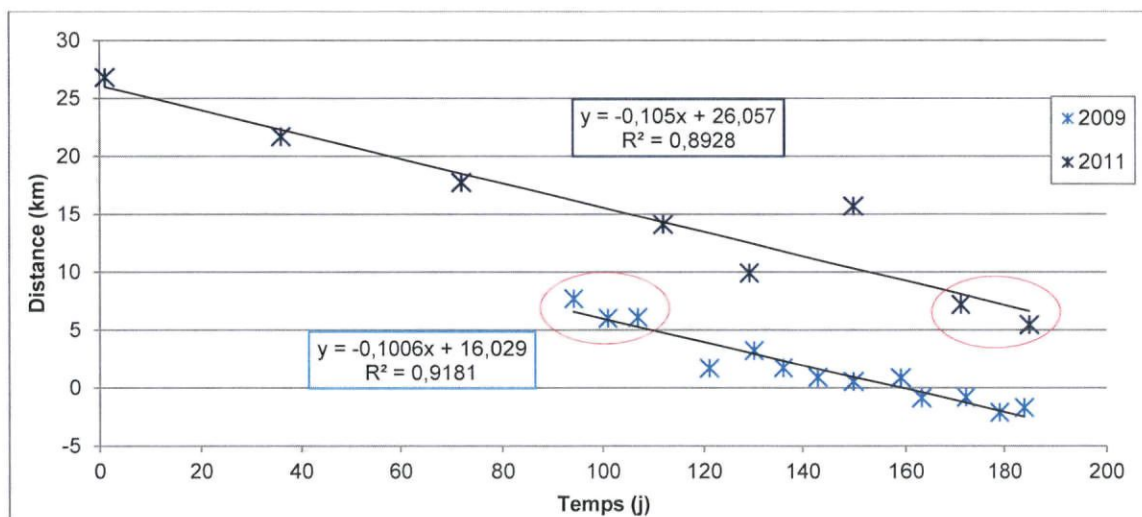


Figure 8 : Relation entre les variables "Distance" et "Temps" avec distinction des années 2009 et 2011

La Figure 8 vient confirmer l'observation précédente. En effet, l'évolution de la « Distance » en fonction du « Temps » suit une pente similaire pour les années 2009 et 2011 ; seul l'ordonnée de la relation linéaire varie.

Le décalage entre les deux ordonnées est à imputer à une différence de débit à une date donnée. Pour des débits égaux (cercle rouges), la distance du front salé à la prise d'eau est la même quelle que soit l'année de mesure. Par conséquent ce décalage pourrait également s'interpréter par un décalage dans le temps de la saison sèche (influant sur le débit des fleuves). En 2009, la saison sèche et ses conséquences en termes d'étiage aurait alors débuté plus tôt dans l'année.

Prenant en compte ces remarques, on pourrait dès lors à partir d'une donnée de débit observée en septembre, et si la pente mesurée ici est la même chaque année, pouvoir approcher, par extrapolation graphique, la distance du front salé à la prise d'eau en fin de saison sèche.

3.3.3. Distance - Marée

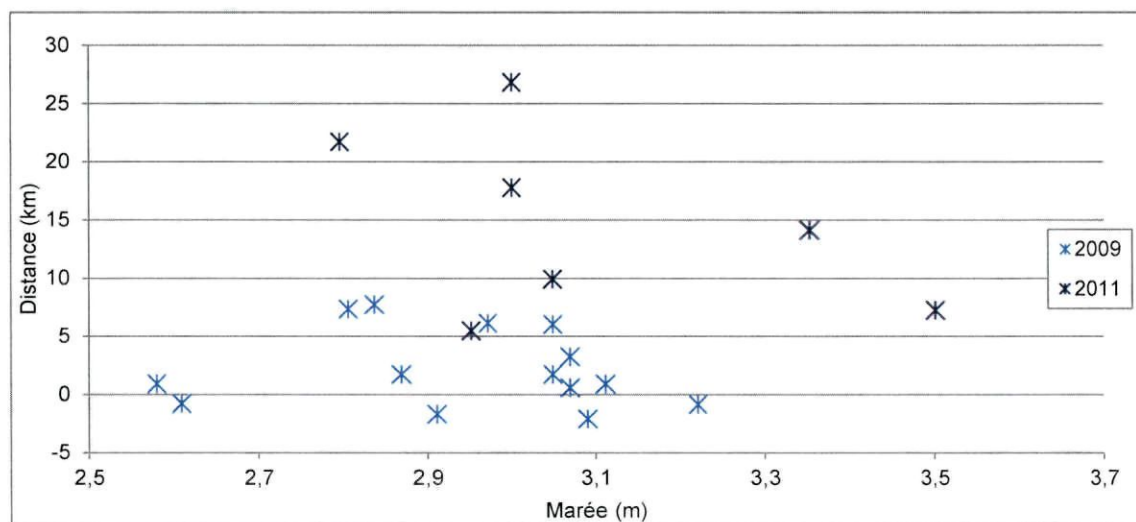


Figure 9 : Relation entre les variables "Distance" et "Marée"

La Figure 9 représente la distance du front salé à la prise d'eau mesurée en fonction de la hauteur de la marée pour chaque campagne de mesures. A première vue, la distribution des points semble aléatoire.

Le graphique suivant (Figure 10) reprend le graphique précédent en précisant pour chaque couple « distance/marée » la valeur du débit correspondant.

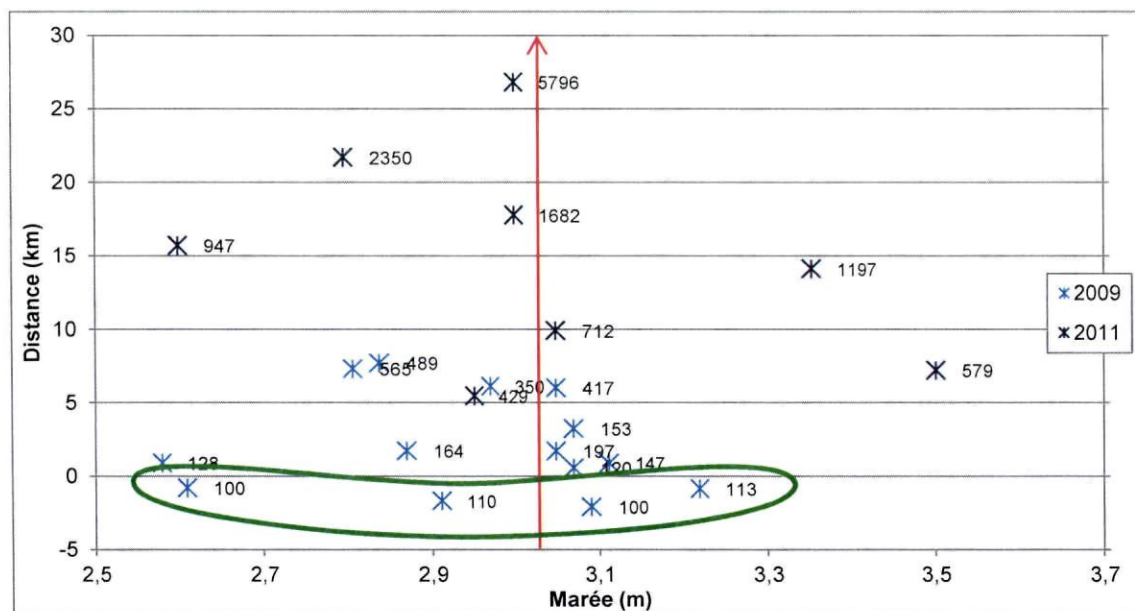


Figure 10 : Relation entre "Distance" et "Marée" et débits correspondants

La flèche rouge indique un gradient de débit (de 100 à 5796 m^3/s) et de distance (de -2,1 à 26,8 km) pour une hauteur de marée d'environ 3m. L'influence prépondérante du débit sur la position du front salé par rapport à celle de la hauteur de la marée est ici clairement mise en évidence.

De même, l'ellipse verte rassemble des points présentant un fort gradient de marée (2,6 à 3,22 m) et pour lesquels les débits associés sont identiques (100/110 m^3/s). L'influence de la marée sur la position du front salé apparaît donc ici comme négligeable.

Le constat suivant s'impose alors : plus les débits sont faibles et donc plus le front salé est « haut » dans le fleuve, moins l'amplitude de la marée n'a d'effet sur la position de ce front salé. Par conséquent, en condition défavorable de fin d'étiage, le paramètre hauteur de la marée devient négligeable.

3.4. MODELISATION DE LA DISTANCE DU FRONT SALE PAR RAPPORT A LA PRISE D'EAU

La modélisation de la variable « Distance » a été réalisée à l'aide du logiciel XLSTAT 2011. Cet outil permet d'effectuer des régressions de type linéaire, polynomial, logarithmique ou encore exponentiel entre plusieurs variables. Dans cette partie, beaucoup de tests ont été effectués. Seul les plus convaincants et ceux permettant d'expliquer la démarche suivie sont présentés ici.

Les détails des modélisations (données brutes, coefficients mathématiques de base, statistiques) proposées dans cette partie sont reportés en Annexe 3.

3.4.1. Modèle 1 « Distance-Débit »

Une régression de type logarithmique a été réalisée entre ces deux variables.

L'équation obtenue est alors la suivante :

$$Distance = 6.87 * \ln(Débit) + -33.88$$

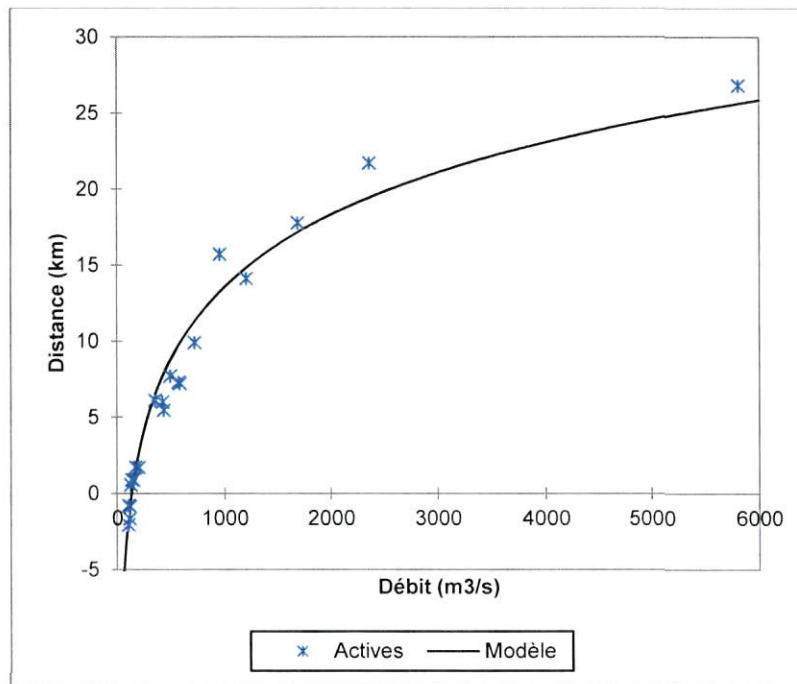


Figure 11 : Régression logarithmique pour les variables "Distance-Débit"

Le coefficient de détermination (R^2) entre la courbe modèle et les observations est de 0,96 pour l'ensemble des données soit 21 mesures. Ce coefficient permet d'évaluer la qualité d'une régression. Sa valeur est comprise entre 0 et 1 et plus elle s'approche de 1, plus la régression est de bonne qualité. Les autres coefficients permettant d'étudier la qualité de la régression sont reportés en Annexe 3.

Elle suit effectivement la tendance des mesures réalisées mais présente des écarts avec les observations pouvant atteindre 2,5 km.

Un affinage du modèle par la prise en compte des autres variables apparaît donc nécessaire.

3.4.2. Modèle 2 « Distance-Débit-Temps-Marée »

Le modèle suivant prend en compte l'ensemble des variables précitées et met en place une régression de type polynomial de deuxième degré. En effet, il a été observé que la conjonction des trois variables « Débit-Marée-Temps » avec des importances respectives différentes, était utile pour modéliser au mieux la variable « Distance ». Ce modèle est établi sur la base de 21 mesures.

L'équation obtenue est alors la suivante :

$$\begin{aligned} \text{Distance} = & -19,77 + 1,7 \cdot 10^{-2} \times (\text{Débit}) + 0,22 \times (\text{Temps}) + 4,93 \times (\text{Marée}) \\ & - 1,66 \cdot 10^{-6} \times (\text{Débit})^2 - 8,19 \cdot 10^{-4} \times (\text{Temps})^2 - 1,24 \times (\text{Marée})^2 \end{aligned}$$

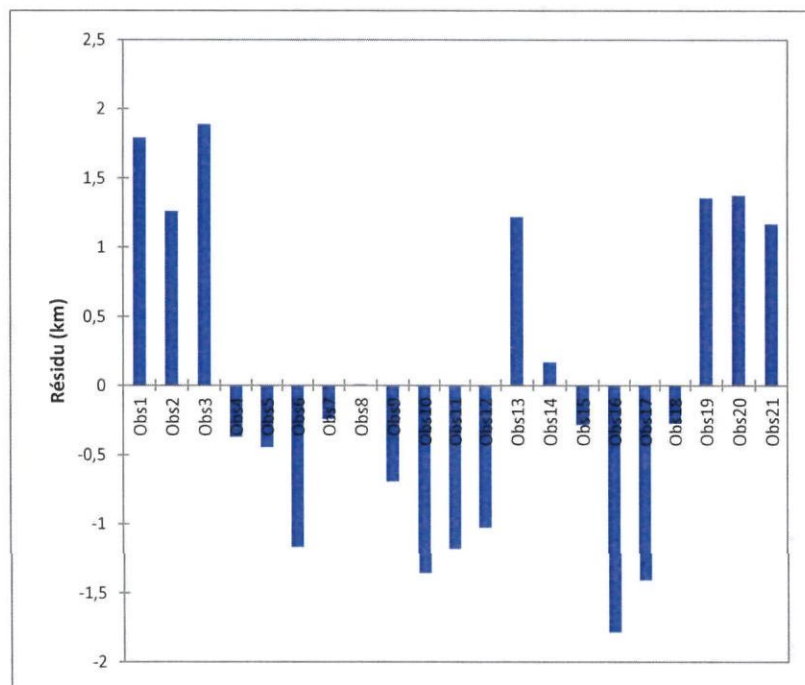


Figure 12 : Ecarts entre valeurs observées et valeurs modélisées par le modèle 2

Ce modèle présente un écart maximal entre valeur observée et valeur modélisée de 1,9 km ainsi qu'un coefficient de détermination de 0,98 (Figure 12). 13 valeurs sur 21 présentent des écarts supérieurs à 1 km.

En augmentant le degré de la fonction polynomiale, le modèle se rapproche des valeurs observées. Ainsi avec une régression polynomiale de degré 10, on obtient un coefficient de corrélation très proche de 1 et un écart maximal entre valeur modélisées et valeurs observées de 400 m. Cependant il n'apparaît pas judicieux de mettre en avant ce genre de modèle car trop « encombrant ».

3.4.3. Modèle 3 « par saison »

Sur la base du modèle 2, les années 2009 et 2010 ont été traitées séparément. En effet ces deux années présentent des situations hydrologiques très différentes.

Pour ces modèles, la variable « Temps » représente le temps écoulé depuis la première mesure respective de chaque campagne.

a) *Modèle 3a « année 2009 »*

Ce modèle est établi sur la base de 13 mesures réalisées durant la saison sèche 2009 et sur une régression polynomiale de second degré.

Les écarts entre les valeurs observées et les valeurs modélisées sont reportés en Figure 13. Le coefficient de détermination (R^2) est de 0,991. L'écart maximal est d'environ 600 m.

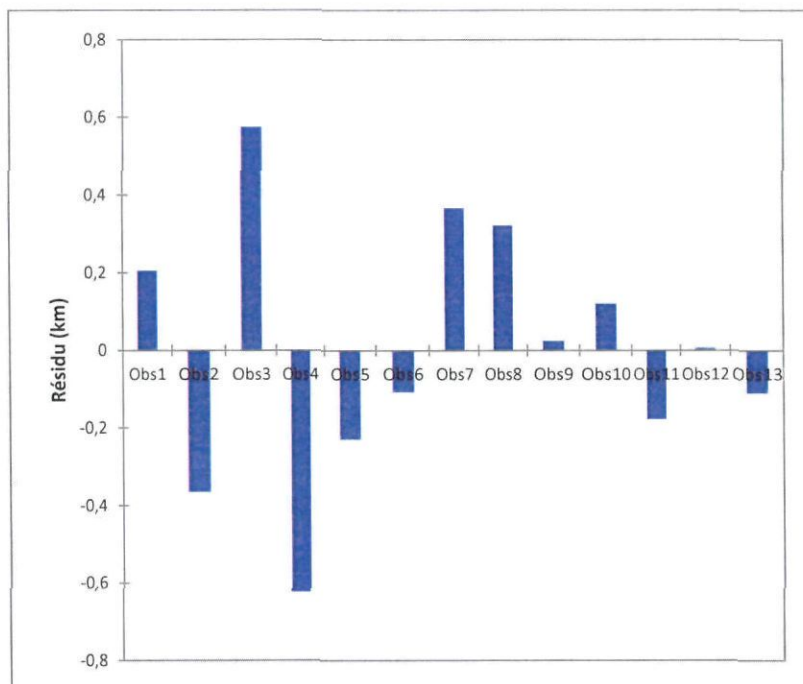


Figure 13 : Ecarts entre valeurs observées et valeurs modélisées par le modèle 3a

Le fait de considérer uniquement l'année 2009 et de se situer dans une plage de débit plus restreinte augmente grandement la précision du modèle.

b) *Modèle 3b « année 2011 »*

Pour l'année 2011, nous disposons de 8 mesures, ce qui est peu pour construire un modèle. De plus les mesures effectuées couvrent une grande plage de débit (de 5800 m^3/s à 430 m^3/s).

La Figure 14 présente les écarts entre valeurs observées et valeurs modélisées pour ce modèle.

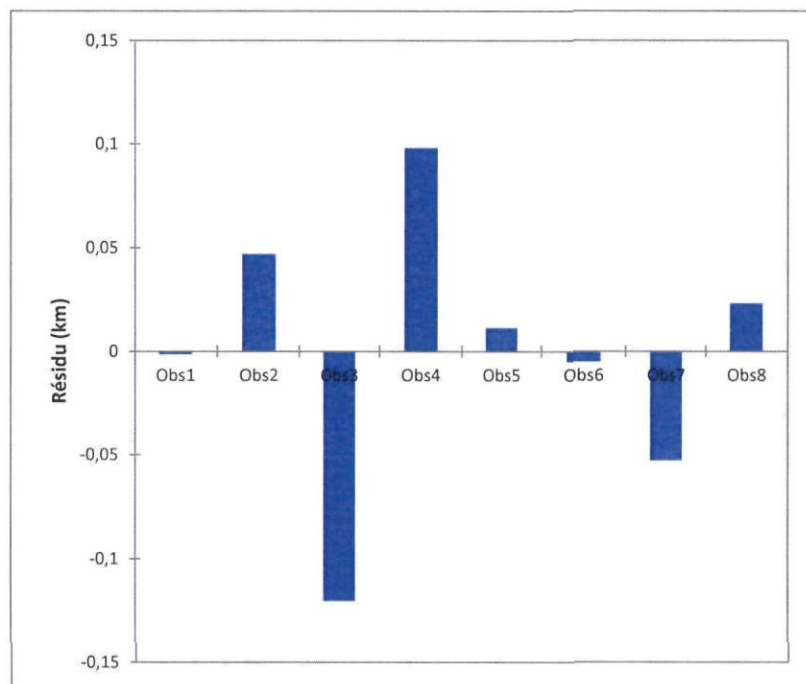


Figure 14 : Ecarts entre valeurs observées et valeurs modélisées par le modèle 3b

Les valeurs modélisées sont très proches des valeurs mesurées avec un écart maximum de 120 m. Cette précision est due au petit nombre de mesure qui ne permet pas de construire un modèle robuste. Néanmoins ce modèle à 4 variables, calculé sur la base de 9 mesures, est le plus à même d'expliquer l'évolution du front salé dans le fleuve Maroni pour l'année 2011.

3.4.4. Modèle 4 « faible débit »

L'objectif premier de cette étude est d'anticiper au mieux une éventuelle contamination du captage d'eau potable sur le Maroni par les eaux marines. Ce phénomène est susceptible d'intervenir en fin de saison sèche, lors d'étiages marqués.

Afin d'affiner la modélisation il est proposé de s'intéresser uniquement aux faibles débits, situations où le captage est potentiellement menacé par une remontée trop en amont du front des 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

On considère comme débit faible, les débits inférieurs à 600 m^3/s , valeur qui correspond au débit moyen journalier du Maroni à la station Langa Tabiki, sur 53 années d'observation, pendant la saison sèche (source : DIREN, 2005).

Ainsi le modèle 4 se base sur 15 valeurs dont 13 issues de l'année 2009. Les écarts entre les valeurs observées et les valeurs calculées par le modèle sont reportés en Figure 15.

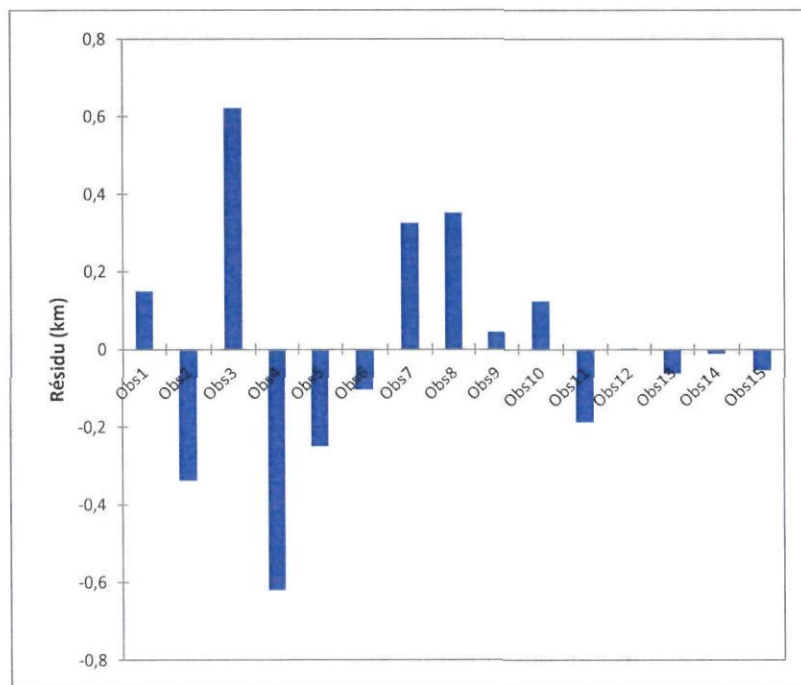


Figure 15 : Ecarts entre valeurs observées et valeurs modélisées par le modèle 4

Avec ce modèle l'écart maximal entre valeurs observées et valeurs modélisées ne dépasse pas 600 m (Figure 15). Le coefficient de détermination est de 0,993 et 70 % des valeurs présentent des écarts inférieurs à 200 m.

A ce titre, le modèle 4 peut être considéré comme adapté à la modélisation de l'évolution du front salé sur le Maroni pour des débits inférieurs à 600 m^3/s

Néanmoins il conviendrait d'acquérir un plus grand nombre de données afin de renforcer le modèle et l'adapter à l'ensemble des situations (Distance/Débit/Temps/Marée) qui peuvent être rencontrées sur le Maroni.

4. Conclusions

Pour l'année 2011, le projet de suivi de l'évolution du front salé sur les fleuves Mana et Maroni recouvrait plusieurs objectifs :

- acquérir des données sur la position du front de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au maximum de sa remontée dans les fleuves ;
- prévenir d'un éventuel risque de contamination des captages d'eau localisés sur ces fleuves et destinés à l'alimentation en eau potable ;
- commencer à étudier la possibilité d'établir des relations entre la position du front salé et d'autres données telles que le débit des fleuves, la hauteur des marées ou encore l'avancement dans la saison sèche.

Sur la période de juin à décembre 2011, 9 campagnes de mesures ont été réalisées sur les fleuves Mana et Maroni pour localiser le front salé au maximum de sa remontée lors des marées les plus hautes (et 8 prises en compte dans ce rapport). Ainsi, durant cette période le front de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ est remonté au maximum à 13,2 km en aval de la prise d'eau de Mana et à 5,45 km en aval de la prise d'eau sur le Maroni. Les captages d'eau n'ont pas été directement menacés par des intrusions salines durant cette année 2011.

Pour l'aspect modélisation, seul le cas du fleuve Maroni a pu être traité, car il n'existe pas actuellement de mesures de débits sur la Mana. Pour le fleuve Maroni, en intégrant les campagnes de suivi de remontée du front salé de 2009, 22 mesures sont aujourd'hui disponibles.

La relation entre le débit du fleuve et la distance du front salé à la prise d'eau au maximum de sa remontée a clairement été mise en évidence pour les années 2009 et 2011. L'influence de la hauteur de marée apparaît, quant à elle, négligeable, particulièrement en fin de saison sèche, quand les débits sont les plus faibles.

L'intégration de la variable « Temps » dans la modélisation, qui représente l'avancement dans la saison, a montré également l'importance de prendre en compte le phénomène d'accumulation d'eau salée dans le système hydrographique estuarien.

Le modèle 4 présenté dans ce rapport propose une modélisation relativement précise de la distance du front salé par rapport à la prise d'eau, en fonction des trois variables (Débit, Temps, Marée), et pour des débits inférieurs à 600 m^3/s . C'est également dans cette plage de débit qu'il est intéressant de pouvoir estimer la position du front salé et prévenir d'une éventuelle contamination des captages.

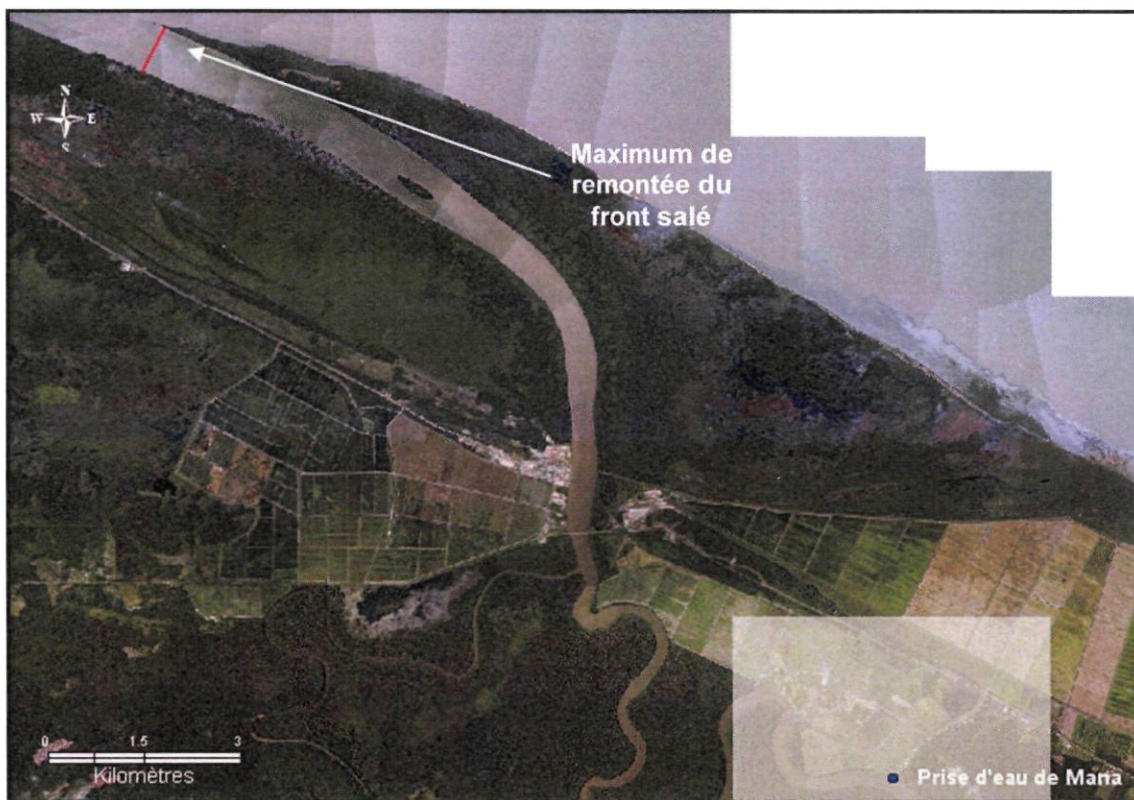
Cependant ce type de modèle, construit sur des bases statistiques, nécessite un plus grand nombre de données pour acquérir une robustesse indispensable à son efficacité. Il apparaît donc primordiale de continuer d'acquérir des données, et plus particulièrement lorsque les débits sont inférieurs à 600 m^3/s .

Annexe 1

Fiches récapitulatives de campagnes de mesures de la conductivité électrique en 2011– La Mana

La Mana – Campagne de mesure n°1 – 6 juin 2011

Situation du front de 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au maximum de sa remontée

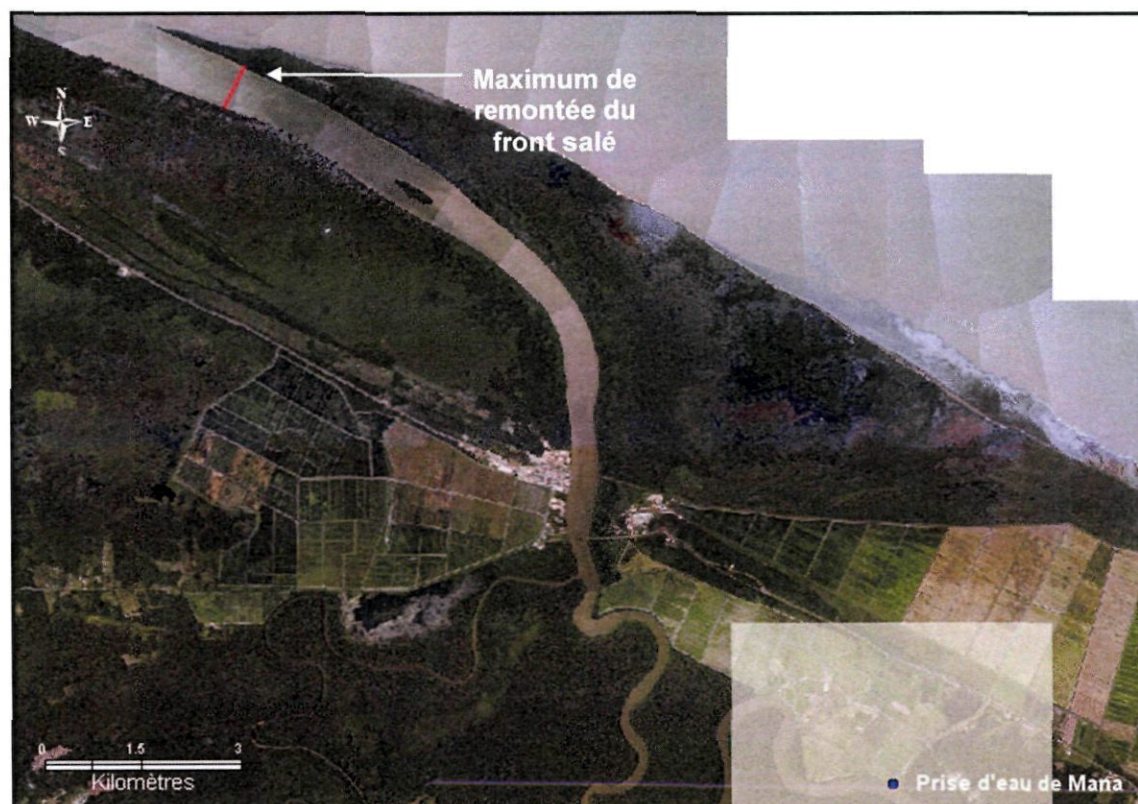


Hauteur de la marée	3,10 m
Heure de la marée haute aux Iles du Salut	7 H 37 m
Heure du maximum de progression du front de 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	9 h 10 m
Distance à la prise d'eau	25,50 km

Remarque : La remontée du front salé dans le fleuve Mana est très peu marquée, ce qui est caractéristique de la saison des pluies. De plus les mesures ont été réalisées lors d'un événement pluvieux important.

La Mana – Campagne de mesure n°2 – 11 juillet 2011

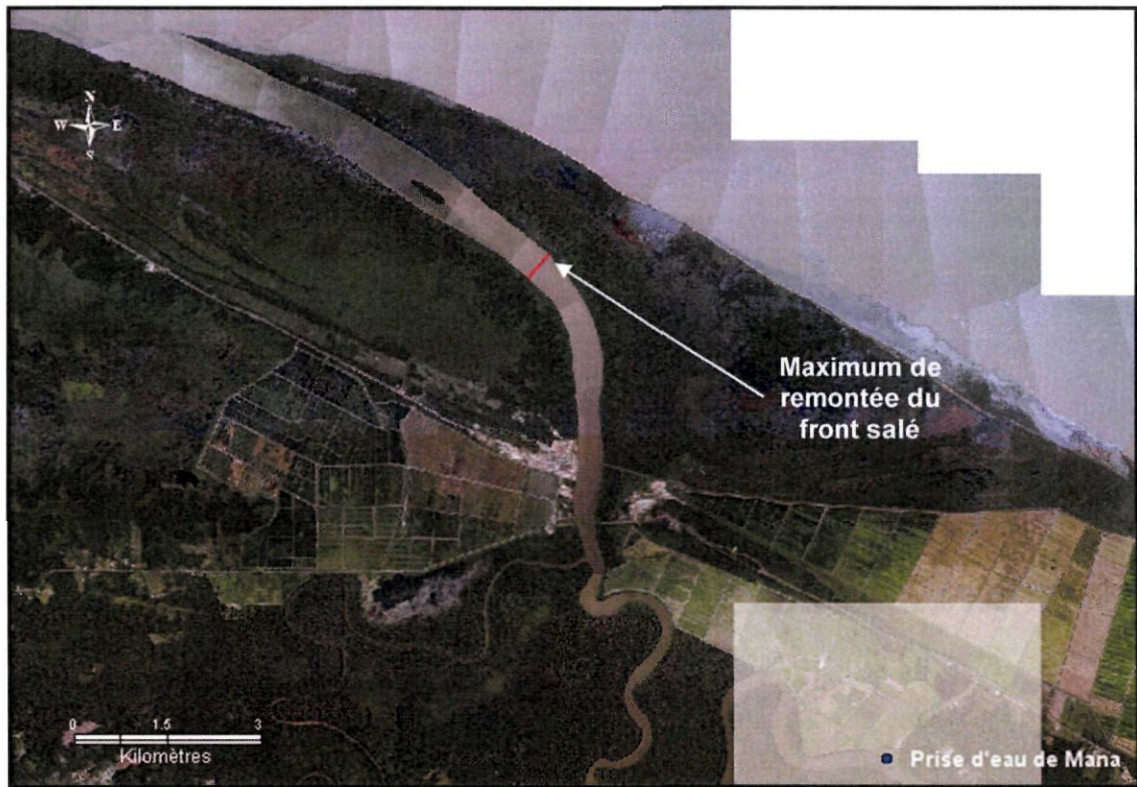
Situation du front de 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au maximum de sa remontée



Hauteur de la marée	2,70 m
Heure de la marée haute aux Iles du Salut	13 H 57 m
Heure du maximum de progression du front de 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	14 h 30 m
Distance à la prise d'eau	23,80 km

La Mana – Campagne de mesure n°3 – 16 août 2011

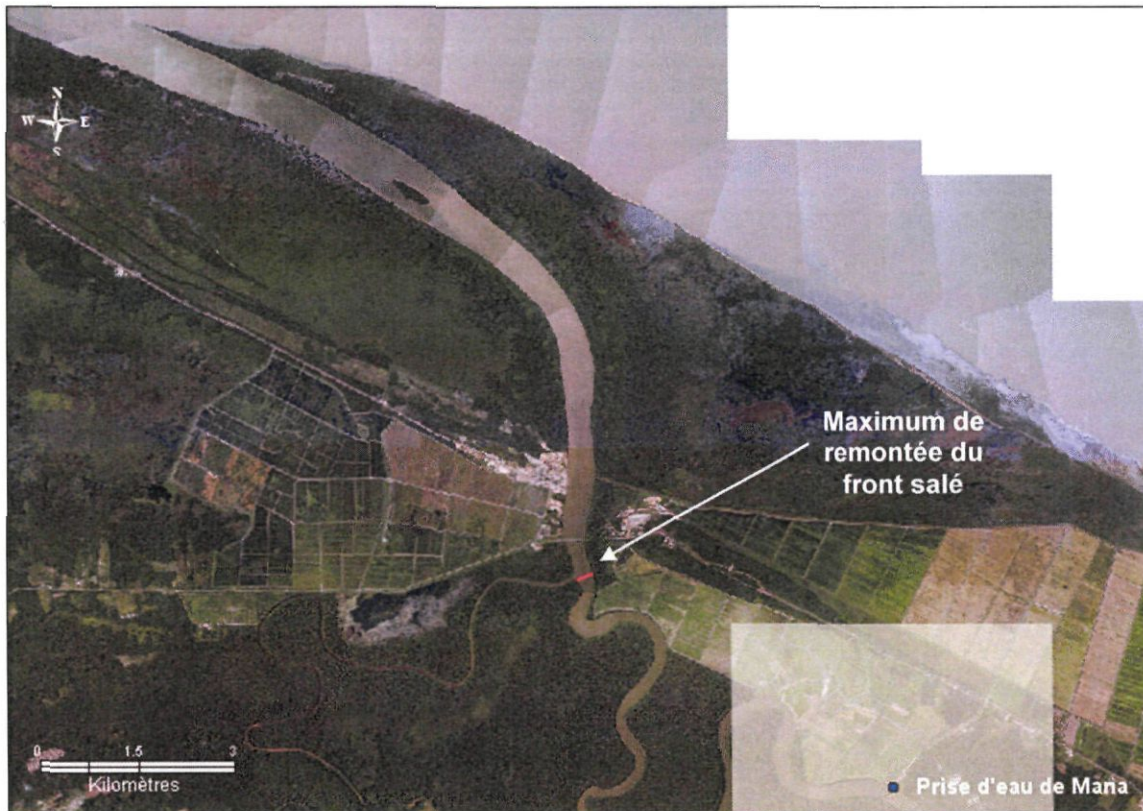
Situation du front de 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au maximum de sa remontée



Hauteur de la marée	3,10 m
Heure de la marée haute aux Iles du Salut	06 H 14 m
Heure du maximum de progression du front de 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	08 h 10 m
Distance à la prise d'eau	18,60 km

La Mana – Campagne de mesure n°4 – 27 septembre 2011

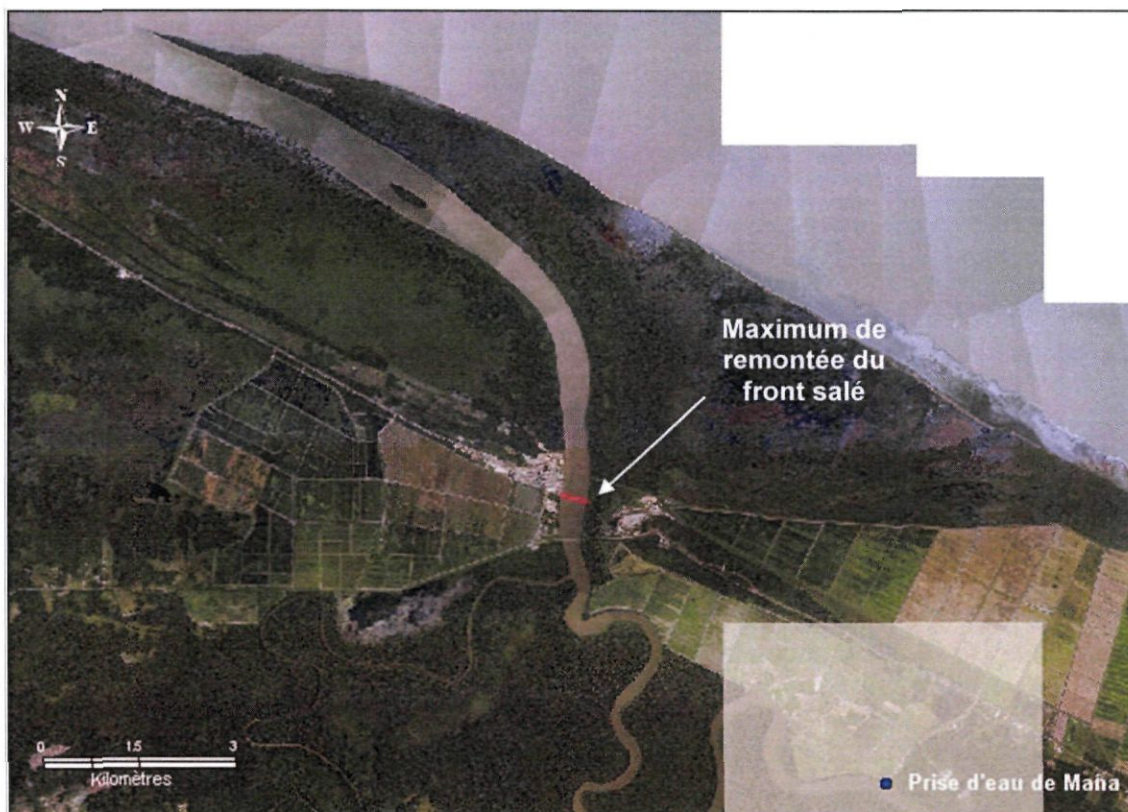
Situation du front de 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au maximum de sa remontée



Hauteur de la marée	3,50 m
Heure de la marée haute aux Iles du Salut	16 H 41 m
Heure du maximum de progression du front de 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	18 h 28 m
Distance à la prise d'eau	13,55 km

La Mana – Campagne de mesure n°5 – 13 octobre 2011

Situation du front de 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au maximum de sa remontée



Hauteur de la marée	2,95 m
Heure de la marée haute aux Iles du Salut	05 h 20 m
Heure du maximum de progression du front de 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	06 h 40 m
Distance à la prise d'eau	14,95 km

La Mana – Campagne de mesure n°6 – 4 novembre 2011

Situation du front de 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au maximum de sa remontée



Hauteur de la marée	2,66 m
Heure de la marée haute aux Iles du Salut	12 H 29 m
Heure du maximum de progression du front de 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	12 h 42 m
Distance à la prise d'eau	15,95 km

La Mana – Campagne de mesure n°7 – 25 novembre 2011

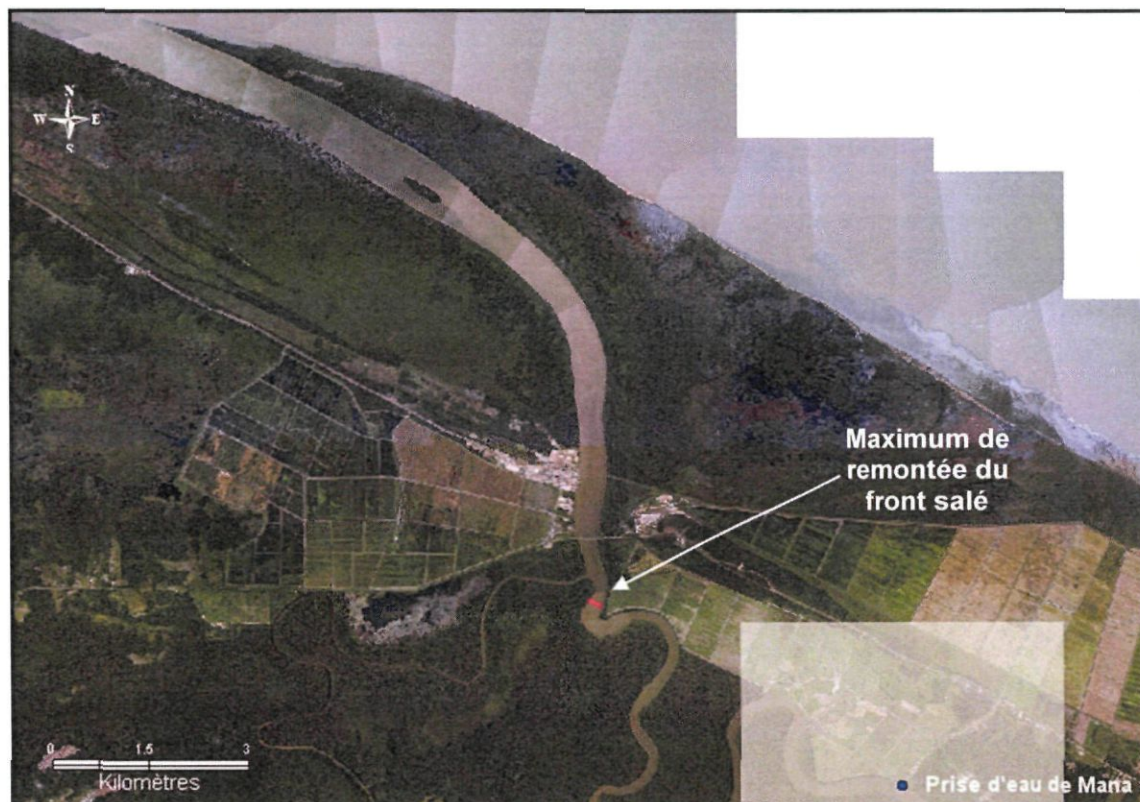
Situation du front de 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au maximum de sa remontée



Hauteur de la marée	3,25 m
Heure de la marée haute aux Iles du Salut	04 h 34 m
Heure du maximum de progression du front de 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	06 h 13 m
Distance à la prise d'eau	15,90 km

La Mana – Campagne de mesure n°8 – 09 décembre 2011

Situation du front de 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au maximum de sa remontée



Hauteur de la marée	2,80 m
Heure de la marée haute aux Iles du Salut	04 H 02 m
Heure du maximum de progression du front de 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	05 h 50 m
Distance à la prise d'eau	13,20 km

Annexe 2

Fiches récapitulatives de campagnes de mesures de la conductivité électrique en 2011– Le Maroni

Le Maroni – Campagne de mesure n°1 – 7 juin 2011

Situation du front de 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au maximum de sa remontée



Hauteur de la marée	3,00 m
Heure de la marée haute aux Iles du Salut	08 H 32 m
Heure du maximum de progression du front de 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	09 h 47 m
Distance à la prise d'eau	26,80 km

Le Maroni – Campagne de mesure n°2 – 12 juillet 2011

Situation du front de 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au maximum de sa remontée



Hauteur de la marée	2,80 m
Heure de la marée haute aux Iles du Salut	14 H 56 m
Heure du maximum de progression du front de 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	16 h 09 m
Distance à la prise d'eau	21,70 km

Remarque : La remontée du front salé dans le Maroni est très hétérogène si on considère toute la largeur du fleuve. En effet la largeur importante (environ 4 km) et les courants parfois très localisés influent sur une progression du front salé plus ou moins marquée selon les endroits.

Le Maroni – Campagne de mesure n°3 – 17 août 2011

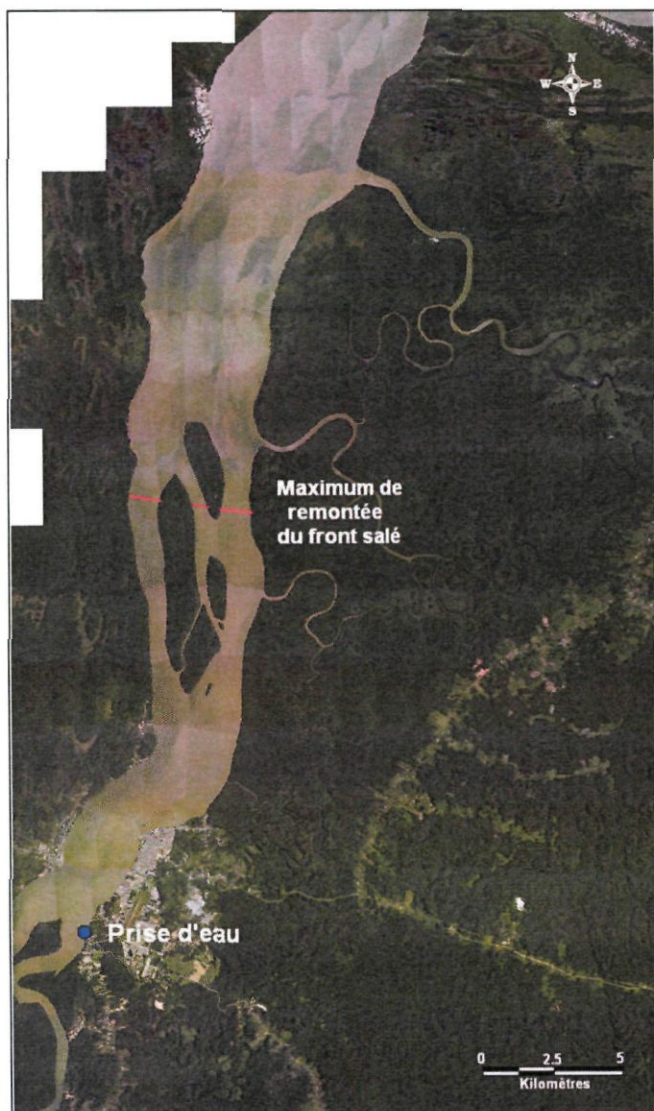
Situation du front de 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au maximum de sa remontée



Hauteur de la marée	3,00 m
Heure de la marée haute aux Iles du Salut	06 H 46 m
Heure du maximum de progression du front de 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	08 h 00 m
Distance à la prise d'eau	17,75 km

Le Maroni – Campagne de mesure n°4 – 26 septembre 2011

Situation du front de 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au maximum de sa remontée



Hauteur de la marée	3,35 m
Heure de la marée haute aux Iles du Salut	15 H 57 m
Heure du maximum de progression du front de 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	17 h 28 m
Distance à la prise d'eau	14,10 km

Remarque : Sur la figure le front salé est représenté sur l'ensemble du fleuve Maroni. Il faut noter que les mesures de conductivité électrique ont été effectuées uniquement sur le bras principal du fleuve, soit le bras de droite.

Le Maroni – Campagne de mesure n°5 – 13 octobre 2011

Situation du front de 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au maximum de sa remontée



Hauteur de la marée	3,05 m
Heure de la marée haute aux Iles du Salut	17 H 28 m
Heure du maximum de progression du front de 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	19 h 16 m
Distance à la prise d'eau	9,90 km

Remarque : Sur la figure le front salé est représenté sur l'ensemble du fleuve Maroni. Il faut noter que les mesures de conductivité électrique ont été effectuées uniquement sur le bras principal du fleuve, soit le bras de droite.

Le Maroni – Campagne de mesure n°6 – 03 novembre 2011

Situation du front de 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au maximum de sa remontée



Hauteur de la marée	2,60 m
Heure de la marée haute aux Iles du Salut	11 H 25 m
Heure du maximum de progression du front de 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	12 h 40 m
Distance à la prise d'eau	15.70 km

Remarque : Sur la figure le front salé est représenté sur l'ensemble du fleuve Maroni. Il faut noter que les mesures de conductivité électrique ont été effectuées uniquement sur le bras principal du fleuve, soit le bras de droite.

Le Maroni – Campagne de mesure n°7 – 24 novembre 2011

Situation du front de 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au maximum de sa remontée



Hauteur de la marée	3,50 m
Heure de la marée haute aux Iles du Salut	15 H 58 m
Heure du maximum de progression du front de 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	18 h 32 m
Distance à la prise d'eau	7,20 km

Le Maroni – Campagne de mesure n°8 – 8 décembre 2011

Situation du front de 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au maximum de sa remontée



Hauteur de la marée	2,95 m
Heure de la marée haute aux Iles du Salut	15 H 32 m
Heure du maximum de progression du front de 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	18 h 11 m
Distance à la prise d'eau	5,45 km

Annexe 3

Données détaillées sur les modèles proposés

Tous les résultats et calculs présentés dans cette annexe ont été obtenus à l'aide du logiciel XLSTAT 2011.

Modèle 1 « Distance – Débit »

Les statistiques descriptives de ce modèle sont :

Variable	Observations	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Distance	21	-2.100	26.800	6.951	8.113
Débit	21	100.300	5796.000	795.207	1285.383

Ce modèle est régi par l'équation :

$$Distance = 6.87 * Ln(Débit) + -33.88$$

Les coefficients d'ajustements associés à ce modèle sont :

Observations	21.000
DDL	19.000
R ²	0.966
SCE	44.326
MCE	2.333
RMCE	1.527

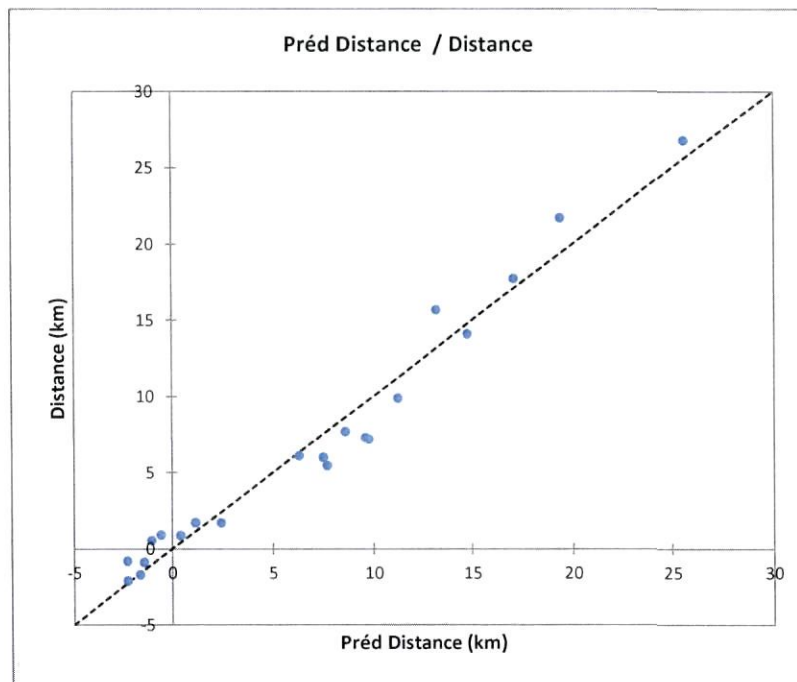
Où DDL est le nombre de degrés de liberté pour le modèle retenu, R² le coefficient de détermination, SCE la Somme des Carrés des Ecart, MCE la Moyenne des Carrés des Ecart et RMCE la racine carré de MCE. Tous ces coefficients servent à évaluer la qualité de l'ajustement proposé.

Les données brutes issues de ce modèle sont :

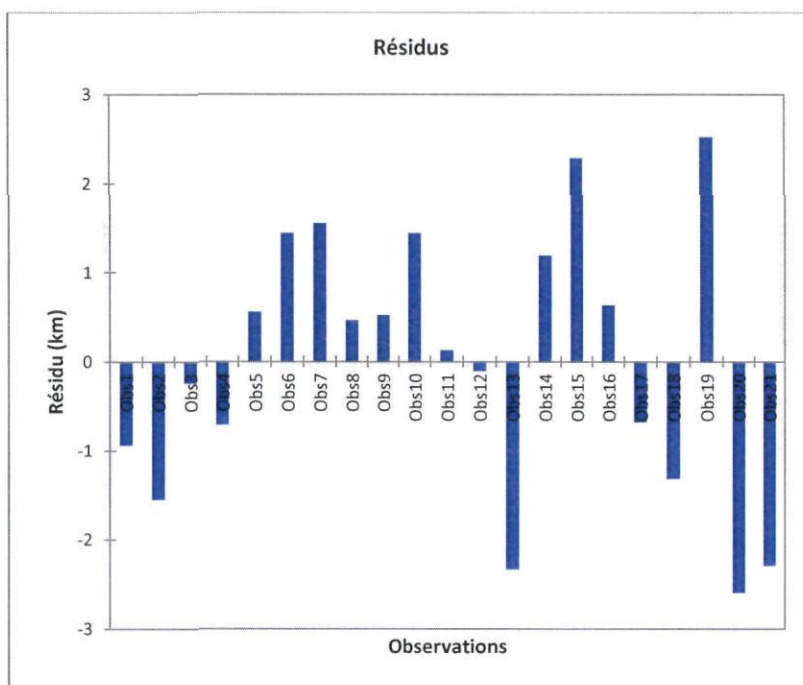
Observations	Débit	Distance	Préd Distance	Résidus
Obs1	489.500	7.700	8.640	-0.940
Obs2	417.400	6.000	7.546	-1.546
Obs3	350.300	6.100	6.343	-0.243
Obs4	197.500	1.700	2.409	-0.709
Obs5	164.700	1.720	1.162	0.558
Obs6	128.500	0.900	-0.542	1.442
Obs7	120.100	0.550	-1.007	1.557
Obs8	147.700	0.880	0.414	0.466

Obs9	113.500	-0.870	-1.395	0.525
Obs10	100.300	-0.800	-2.243	1.443
Obs11	100.500	-2.100	-2.230	0.130
Obs12	110.300	-1.700	-1.591	-0.109
Obs13	565.800	7.300	9.635	-2.335
Obs14	5796.000	26.800	25.609	1.191
Obs15	2350.000	21.700	19.411	2.289
Obs16	1682.000	17.750	17.115	0.635
Obs17	1197.150	14.100	14.780	-0.680
Obs18	712.300	9.900	11.216	-1.316
Obs19	947.300	15.700	13.173	2.527
Obs20	579.000	7.200	9.793	-2.593
Obs21	429.500	5.450	7.742	-2.292

Le graphique ci-dessous représente la variable « Distance » observée en fonction de la variable « Distance » calculée par le modèle 1.



Les écarts (ou résidus) entre les distances observées et modélisées sont reportés sur la figure ci-dessous.



Modèle 2 « Distance – Débit-Temps -Marée »

Les statistiques descriptives de ce modèle sont :

Variable	Observations	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Distance (km)	21	-2.100	26.800	6.951	8.113
Débit (m ³ /s)	21	100.300	5796.000	795.207	1285.383
Temps (j)	21	1.000	192.000	131.286	50.222
Marée (m)	21	2.580	3.500	2.973	0.230

La matrice de corrélation associée à ce modèle est présentée par le tableau ci-dessous.

Variables	Débit (m ³ /s)	Temps (j)	Marée (m)	Distance (km)
Débit (m ³ /s)	1.000	-0.790	0.016	0.855
Temps (j)	-0.790	1.000	0.019	-0.788
Marée (m)	0.016	0.019	1.000	-0.019
Distance (km)	0.855	-0.788	-0.019	1.000

Cette matrice de corrélation est celle de Pearson appelée aussi la matrice des variances-covariances. C'est la matrice de coefficients de corrélations, coefficient qui représente l'influence que les variables ont entre elles. Ce coefficient varie de -1 à 1, lorsqu'il est proche de 0 l'influence est nulle lorsque qu'il est proche de 1 ou de -1, l'influence est forte.

Ce modèle est régi par l'équation :

$$\begin{aligned} \text{Distance} = & -19,77 + 1,7 \cdot 10^{-2} \times (\text{Débit}) + 0,22 \times (\text{Temps}) + 4,93 \times (\text{Marée}) \\ & - 1,66 \cdot 10^{-6} \times (\text{Débit})^2 - 8,19 \cdot 10^{-4} \times (\text{Temps})^2 - 1,24 \times (\text{Marée})^2 \end{aligned}$$

Les coefficients d'ajustements associés à ce modèle sont :

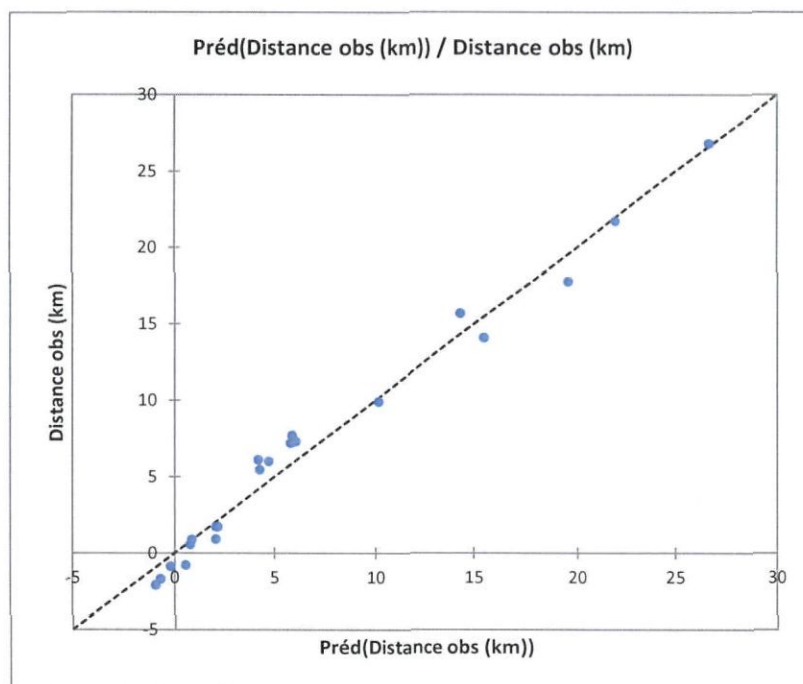
Observations	21.000
DDL	14.000
R ²	0.980
SCE	26.815
MCE	1.915
RMCE	1.384

Les données brutes issues de ce modèle sont :

Observations	Débit (m3/s)	Temps (j)	Marée (m)	Distance (km)	Préd (Distance (km))	Résidus
Obs1	489.500	94.000	2.840	7.700	5.908	1.792
Obs2	417.400	101.000	3.050	6.000	4.740	1.260
Obs3	350.300	107.000	2.970	6.100	4.211	1.889
Obs4	197.500	121.000	3.050	1.700	2.070	-0.370
Obs5	164.700	136.000	2.870	1.720	2.166	-0.446
Obs6	128.500	143.000	2.580	0.900	2.067	-1.167
Obs7	120.100	150.000	3.070	0.550	0.792	-0.242
Obs8	147.700	159.000	3.110	0.880	0.872	0.008
Obs9	113.500	163.000	3.220	-0.870	-0.176	-0.694
Obs10	100.300	172.000	2.610	-0.800	0.555	-1.355
Obs11	100.500	179.000	3.090	-2.100	-0.919	-1.181
Obs12	110.300	184.000	2.910	-1.700	-0.672	-1.028
Obs13	565.800	192.000	2.810	7.300	6.083	1.217
Obs14	5796.000	1.000	3.000	26.800	26.630	0.170
Obs15	2350.000	36.000	2.800	21.700	21.982	-0.282
Obs16	1682.000	72.000	3.000	17.750	19.534	-1.784
Obs17	1197.150	112.000	3.350	14.100	15.509	-1.409

Obs18	712.300	129.000	3.050	9.900	10.173	-0.273
Obs19	947.300	150.000	2.600	15.700	14.345	1.355
Obs20	579.000	171.000	3.500	7.200	5.827	1.373
Obs21	429.500	185.000	2.950	5.450	4.282	1.168

Le graphique ci-dessous représente la variable « Distance » observée en fonction de la variable « Distance » calculée par le modèle 2.



Le graphique des écarts (ou résidus) entre les distances observées et modélisées est intégré dans le paragraphe 3.4.2 du présent rapport.

Modèle 3a « année 2009 »

Les statistiques descriptives de ce modèle sont :

Variable	Observations	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Distance (km)	13	-2.100	7.700	2.106	3.471
Débit (m ³ /s)	13	100.300	565.800	231.238	164.732
Temps (j)	13	1.000	99.000	53.231	32.637
Marée (m)	13	2.580	3.220	2.937	0.192

La matrice de corrélation associée à ce modèle est présentée par le tableau ci-dessous.

Variables	Débit (m3/s)	Temps (j)	Marée (m)	Distance (km)
Débit (m3/s)	1.000	-0.389	-0.110	0.957
Temps (j)	-0.389	1.000	-0.068	-0.586
Marée (m)	-0.110	-0.068	1.000	-0.134
Distance (km)	0.957	-0.586	-0.134	1.000

Ce modèle est régi par l'équation :

$$\text{Distance} = -24,2 + 3,24 \cdot 10^{-2} \times (\text{Débit}) + 7,64 \cdot 10^{-2} \times (\text{Temps}) + 14,85 \times (\text{Marée}) - 1,62 \cdot 10^{-5} \times (\text{Débit})^2 - 8,95 \cdot 10^{-4} \times (\text{Temps})^2 - 2,79 \times (\text{Marée})^2$$

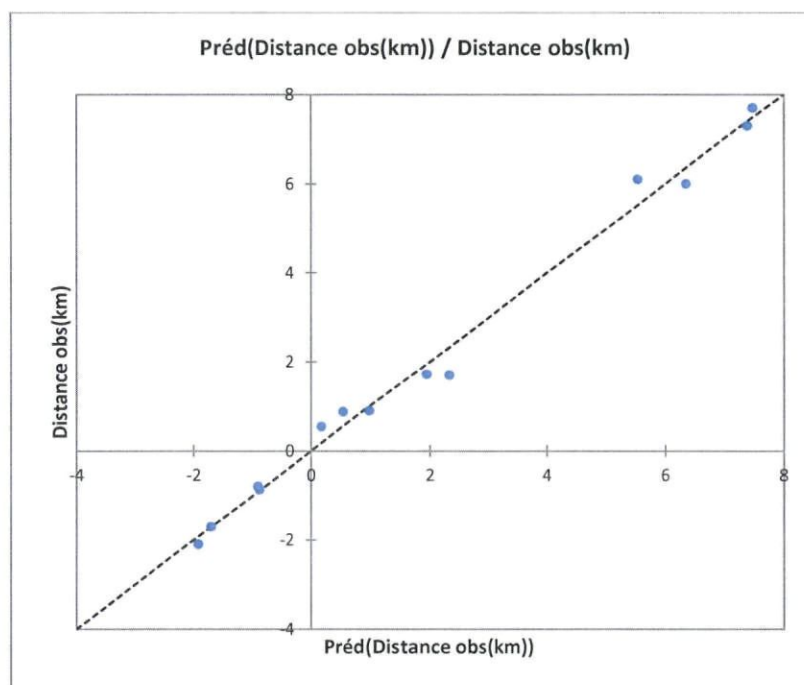
Les coefficients d'ajustements associés à ce modèle sont :

Observations	13.000
DDL	6.000
R ²	0.991
SCE	1.256
MCE	0.209
RMCE	0.458

Les données brutes issues de ce modèle sont :

Observations	Débit (m3/s)	Temps (j)	Marée (m)	Distance (km)	Préd(Distance (km))	Résidus
Obs1	489.500	1.000	2.840	7.700	7.496	0.204
Obs2	417.400	8.000	3.050	6.000	6.366	-0.366
Obs3	350.300	14.000	2.970	6.100	5.525	0.575
Obs4	197.500	28.000	3.050	1.700	2.324	-0.624
Obs5	164.700	43.000	2.870	1.720	1.950	-0.230
Obs6	128.500	50.000	2.580	0.900	1.008	-0.108
Obs7	120.100	57.000	3.070	0.550	0.184	0.366
Obs8	147.700	66.000	3.110	0.880	0.559	0.321
Obs9	113.500	70.000	3.220	-0.870	-0.894	0.024
Obs10	100.300	79.000	2.610	-0.800	-0.920	0.120
Obs11	100.500	86.000	3.090	-2.100	-1.921	-0.179
Obs12	110.300	91.000	2.910	-1.700	-1.706	0.006
Obs13	565.800	99.000	2.810	7.300	7.411	-0.111

Le graphique ci-dessous représente la variable « Distance » observée en fonction de la variable « Distance » calculée par le modèle 3a.



Le graphique des écarts (ou résidus) entre les distances observées et modélisées est intégré dans le paragraphe 3.4.2 a) du présent rapport.

Modèle 3b « année 2011 »

Les statistiques descriptives de ce modèle sont :

Variable	Observations	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Distance	8	5.450	26.8	14.775	7.339
Débit	8	429.5	5796	1711.6	1767.352
Marée	8	2.6	3.5	3.031	0.285
Temps	8	1.000	184	106.75	65.200

La matrice de corrélation associée à ce modèle est présentée par le tableau ci-dessous.

Variables	Débit	Marée	Temps	Distance
Débit	1.000	-0.157	-0.874	0.870
Marée	-0.157	1.000	0.212	-0.393
Temps	-0.874	0.212	1.000	-0.944
Distance	0.870	-0.393	-0.944	1.000

Ce modèle est régi par l'équation :

$$\text{Distance} = -82,6 + 1,22 \cdot 10^{-2} \times (\text{Débit}) + 13,56 \cdot 10^{-2} \times (\text{Temps}) + 53,79 \times (\text{Marée}) - 1,16 \cdot 10^{-6} \times (\text{Débit})^2 - 5,45 \cdot 10^{-4} \times (\text{Temps})^2 - 8,05 \times (\text{Marée})^2$$

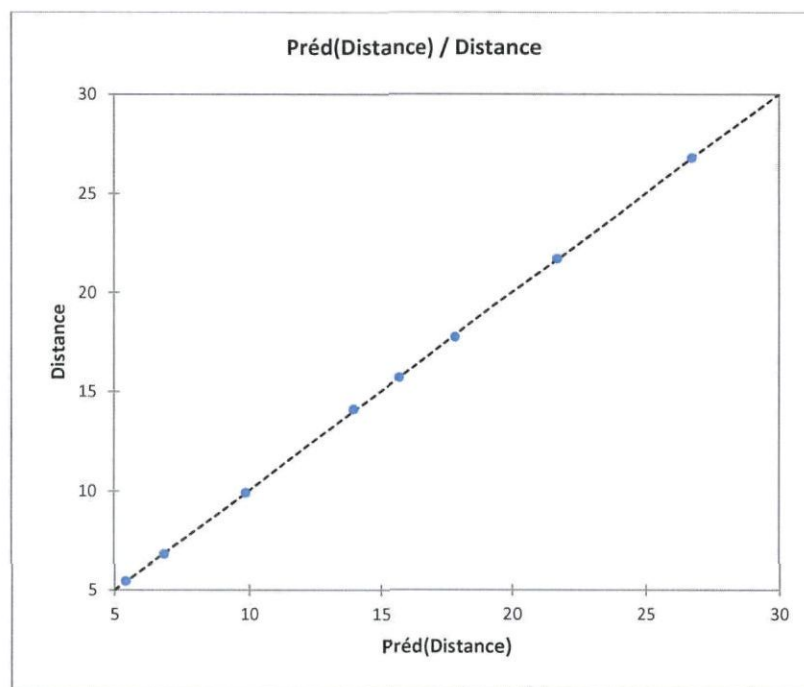
Les coefficients d'ajustements associés à ce modèle sont :

Observations	8.000
DDL	1.000
R ²	1.000
SCE	0.030
MCE	0.030
RMCE	0.173

Les données brutes issues de ce modèle sont :

Observations	Débit	Marée	Temps	Distance	Préd(Distance)	Résidus
Obs1	5796.000	3.000	1.000	26.800	26.801	-0.001
Obs2	2350.000	2.800	36.000	21.700	21.653	0.047
Obs3	1682.000	3.000	72.000	17.750	17.870	-0.120
Obs4	1197.150	3.350	112.000	14.100	14.002	0.098
Obs5	712.300	3.050	129.000	9.900	9.889	0.011
Obs6	947.300	2.600	150.000	15.700	15.705	-0.005
Obs7	579.000	3.500	170.000	6.800	6.853	-0.053
Obs8	429.500	2.950	184.000	5.450	5.427	0.023

Le graphique ci-dessous représente la variable « Distance » observée en fonction de la variable « Distance » calculée par le modèle 3b.



Le graphique des écarts (ou résidus) entre les distances observées et modélisées est intégré dans le paragraphe 3.4.3 b) du présent rapport.

Modèle 4 « faible débit »

Les statistiques descriptives de ce modèle sont :

Variable	Observations	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Distance (km)	15	-2.100	7.700	2.669	3.555
Débit (m^3/s)	15	100.300	579.000	267.640	182.445
Temps (j)	15	94.000	192.000	150.467	32.326
Marée (m)	15	2.580	3.500	2.975	0.230

La matrice de corrélation associée à ce modèle est présentée par le tableau ci-dessous.

Variables	Débit (m^3/s)	Temps (j)	Marée (m)	Distance (km)
Débit (m^3/s)	1.000	-0.134	0.231	0.957
Temps (j)	-0.134	1.000	0.066	-0.359
Marée (m)	0.231	0.066	1.000	0.133
Distance (km)	0.957	-0.359	0.133	1.000

Ce modèle est régi par l'équation :

$$\begin{aligned} \text{Distance} = & -43,6 + 2,98.10^{-2} \times (\text{Débit}) + 2,41.10^{-1} \times (\text{Temps}) + 18,41 \times (\text{Marée}) \\ & - 1,25.10^{-5} \times (\text{Débit})^2 - 8.96.10^{-4} \times (\text{Temps})^2 - 3,41 \times (\text{Marée})^2 \end{aligned}$$

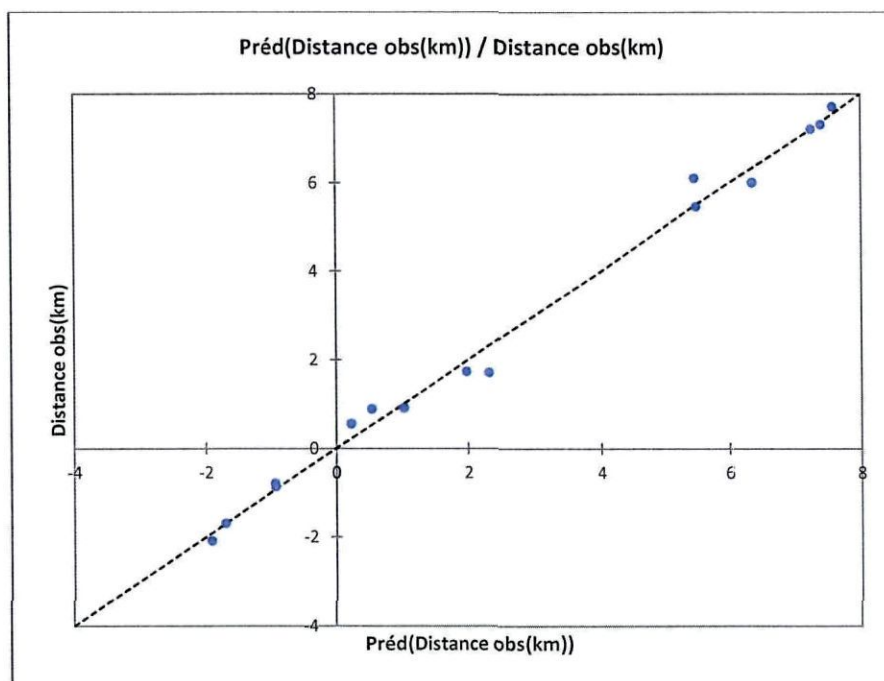
Les coefficients d'ajustements associés à ce modèle sont :

Observations	15.000
DDL	8.000
R ²	0.993
SCE	1.271
MCE	0.159
RMCE	0.399

Les données brutes issues de ce modèle sont :

Observations	Débit (m3/s)	Temps (j)	Marée (m)	Distance (km)	Préd(Distance (km))	Résidus
Obs1	489.500	94.000	2.840	7.700	7.549	0.151
Obs2	417.400	101.000	3.050	6.000	6.338	-0.338
Obs3	350.300	107.000	2.970	6.100	5.478	0.622
Obs4	197.500	121.000	3.050	1.700	2.320	-0.620
Obs5	164.700	136.000	2.870	1.720	1.969	-0.249
Obs6	128.500	143.000	2.580	0.900	1.004	-0.104
Obs7	120.100	150.000	3.070	0.550	0.224	0.326
Obs8	147.700	159.000	3.110	0.880	0.528	0.352
Obs9	113.500	163.000	3.220	-0.870	-0.915	0.045
Obs10	100.300	172.000	2.610	-0.800	-0.925	0.125
Obs11	100.500	179.000	3.090	-2.100	-1.912	-0.188
Obs12	110.300	184.000	2.910	-1.700	-1.703	0.003
Obs13	565.800	192.000	2.810	7.300	7.362	-0.062
Obs14	579.000	171.000	3.500	7.200	7.211	-0.011
Obs15	429.500	185.000	2.950	5.450	5.504	-0.054

Le graphique ci-dessous représente la variable « Distance » observée en fonction de la variable « Distance » calculée par le modèle 4.



Le graphique des écarts (ou résidus) entre les distances observées et modélisées est intégré dans le paragraphe 3.4.4 du présent rapport.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional “Guyane”
Domaine de Suzini – Route de Montabo
BP 552
97333 – CAYENNE - France
Tél. : 05 94 30 06 24