

Modélisation hydrodynamique de la plaine alluviale du Nord – République d'Haïti

Assistance technique du BRGM

Livrable n°4 : rapport final

BRGM/RC-67407-FR
Janvier 2018

Modélisation hydrodynamique de la plaine alluviale du Nord – République d’Haïti

Assistance technique du BRGM

Livrable n°4 : rapport final

BRGM/RC-67407-FR
Janvier 2018

Arnaud L.

Vérificateur :

Nom : A. Gutierrez

Fonction : Chef de projet

Date : 18/01/2018

Signature :



Approbateur :

Nom : P. Audigane

Fonction : Responsable unité GDR

Date : 22/01/2018

Signature :



Le système de management de la qualité et de l’environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.



USAID



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés : alluvions, eaux souterraines, irrigation, modélisation hydrodynamique, MARTHE, République d'Haïti.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Arnaud L. (2018) – Modélisation hydrodynamique de la plaine alluviale du Nord (République d'Haïti). Assistance technique du BRGM. Livrable n° 4. Rapport final. BRGM/RC-67407-FR, 79 p., 48 ill.

Synthèse

Le projet AVANSE, financé par USAID, vise à encourager un développement agricole durable dans le Nord et le Nord-Est d'Haïti. Dans le but de déterminer si la ressource en eau souterraine mobilisable est suffisante pour le projet, il a été confié au BRGM l'établissement d'un modèle hydrodynamique de la Plaine alluviale du Nord.

Tout au long du projet de modélisation, les différents travaux ont été réalisés en étroite collaboration avec DAI (Development Alternatives Inc.), maître d'œuvre du projet AVANSE, l'Université de Port-au-Prince et l'Université de Limonade.

À partir des données compilées et/ou acquises au cours du projet AVANSE, un modèle hydrodynamique de la Plaine du Nord d'Haïti a pu être développé sous MARTHE, code de calcul du BRGM.

Le bilan hydraulique de la nappe alluviale, établi en régime permanent, met en avant une disponibilité encore significative de la ressource en eau souterraine à l'échelle de la plaine, un drainage de la nappe par les principaux cours d'eau, une pression quantitative plus importante sur le bassin versant de Haut-du-Cap et des conditions d'alimentation moins favorables pour le bassin de la rivière Marion.

Si le calage du modèle n'a pu se faire qu'en régime hydraulique permanent par manque de données, des modélisations théoriques en régime transitoire ainsi que la simulation d'un scénario d'irrigation ont été mises en œuvre. Celles-ci apportent des éléments de décision sur lesquels le projet AVANSE peut s'appuyer pour planifier un programme d'irrigation à l'échelle de la plaine :

- ✓ Les conditions d'alimentation de la nappe alluviale semblent autoriser la mise en service de pompages agricoles sur les différentes zones d'intérêt du projet. Une reconstitution rapide de la réserve en eau est notamment simulée après arrêt de la campagne d'irrigation. C'est également le cas en période de sécheresse, à l'exception des zones situées sur l'extrémité amont de la plaine.
- ✓ Les rabattements de nappe simulés au droit des puits de pompages sont pluri-métriques et se propageraient au-delà des zones de culture. De tels rabattements ne permettraient pas de s'appuyer sur les puits existants, trop superficiels. L'implantation de forages plus profonds (> 20m) sera probablement à envisager, en particulier pour satisfaire les besoins dans un contexte de sécheresse prolongée (basses eaux) comme celui observé entre 2014 et 2016.
- ✓ Les zones de Cap Haïtien et de Caracol sont plus particulièrement vulnérables à une intrusion d'eaux salines en provenance de l'océan. Le risque est bien entendu accru sous l'effet des pompages, et en condition de recharge déficitaire.

Comme tout modèle hydrodynamique, le modèle maillé de la Plaine du Nord présente des incertitudes et des limites d'utilisation qu'il convient de garder à l'esprit, en particulier dans un contexte où les données disponibles et les connaissances restent partielles :

- ✓ En l'absence de chroniques piézométriques et pluviométriques, le calage du modèle de nappe n'a pu être conduit qu'en régime hydraulique permanent. Il ne s'agit que d'une première étape de travail qui devra être complétée par un calage en régime transitoire

permettant notamment de prendre en compte les capacités de stockage / déstockage de l'aquifère.

- ✓ Concernant la piézométrie de la nappe alluviale, peu d'observations de terrain sont disponibles sur l'extrémité amont de la plaine ainsi que sur le bassin versant de la rivière Marion et sur la moitié est du bassin de Trou du Nord. L'acquisition de données de référence supplémentaires dans ces secteurs permettrait de consolider le calage de la piézométrie en régime permanent.
- ✓ La méconnaissance des paramètres descriptifs du réseau hydrographique modélisé induit des incertitudes dans le calcul des échanges nappe-rivière, en particulier les cotes du fil d'eau et du fond du lit des rivières. Une campagne de levés topographiques (profils en travers) a été lancée fin 2017 par le projet AVANSE, les données en cours d'acquisition pourront utilement être intégrées dans le modèle.
- ✓ Dans le même ordre d'idée, les écoulements superficiels simulés par le modèle ne peuvent être considérés comme calés en l'absence d'un travail en régime transitoire. Aussi, les flux d'échange modélisés entre les cinq cours d'eau principaux et la nappe alluviale sont à considérer avec précaution.
- ✓ Les apports par le domaine extérieur, principalement par les eaux ruisselées sur le massif du Nord, sont toujours difficilement quantifiables sur le terrain. Cependant, afin de valider les calculs du modèle vis-à-vis des flux entrants par l'amont, l'acquisition continue de données hydro-climatiques est préconisée, avec *a minima* le suivi 1) des débits des principaux cours d'eau à leur débouché dans la plaine, 2) des fluctuations piézométriques sur l'amont de la plaine alluviale et 3) des précipitations sur le massif.

La connaissance des prélèvements, en nappe comme en rivière, reste incomplète. Certains ouvrages récents ont possiblement échappé à l'inventaire réalisé (parc industriel de Caracol, grandes exploitations agricoles, etc.). Des travaux d'enquête complémentaires sont à envisager pour intégrer les informations géologiques et hydrogéologiques de ces ouvrages. Les nouvelles données acquises pourront aisément être introduites dans le modèle. Dans la mesure du possible, cette première version du modèle doit s'inscrire dans la durée et évoluer avec l'amélioration des connaissances hydrogéologiques et climatiques. Les actions de formation menées tout au long du projet de modélisation devraient, par ailleurs, faciliter les mises à jour futures du modèle.

À ce stade, il est primordial de pérenniser le programme de surveillance des ressources en eau et du climat initié dans le cadre du projet AVANSE. Seule l'acquisition de nouvelles données climatiques, hydrologiques et piézométriques permettra, en effet, de procéder à un calage du modèle en régime transitoire, étape indispensable pour se doter d'un véritable outil de gestion de la nappe alluviale.

Sommaire

1. Introduction	9
1.1. CADRE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	9
1.2. DEROULEMENT DE L'ETUDE ET LIVRABLES	10
2. Synthèse hydrogéologique.....	11
3. Construction du modèle hydrodynamique de la Plaine du Nord	15
3.1. LE CODE DE CALCUL MARTHE	15
3.2. STRUCTURE ET EMPRISE DU MODELE	16
3.2.1. Maillage et extensions	16
3.2.2. Géométrie de l'aquifère alluvial	17
3.3. CONDITIONS HYDRAULIQUES AUX LIMITES DU MODELE.....	20
3.4. ZONES DE RECHARGE	21
3.4.1. Données climatiques disponibles	21
3.4.2. Définition des zones de recharge.....	22
3.5. REPRESENTATION DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE.....	24
3.6. PRELEVEMENTS.....	26
4. Calage en régime permanent.....	29
4.1. DONNEES DE REFERENCE POUR LE CALAGE.....	29
4.1.1. Niveaux piézométriques.....	29
4.1.2. Débits des cours d'eau	30
4.1.3. Sources et zones humides.....	32
4.1.4. Paramètres hydrodynamiques	32
4.2. PRINCIPALES ETAPES SUIVIES LORS DU PROCESSUS DE CALAGE	33
4.2.1. Ajustement des perméabilités	34
4.2.2. Ajustement des charges imposées en amont.....	35
4.2.3. Ajustement de la recharge	36
4.3. RESULTATS OBTENUS.....	37
4.3.1. Champ de perméabilité	37
4.3.2. Piézométrie.....	37
4.3.3. Débits des principaux cours d'eau	41
4.3.4. Zones de débordement.....	42
4.3.5. Bilan hydraulique	43

4.4. PRINCIPALES INCERTITUDES ET PERSPECTIVES D'AMELIORATION	44
5. Exploitation du modèle.....	47
5.1. REGIME TRANSITOIRE « MOYEN ».....	47
5.1.1. Description du modèle	47
5.1.2. Résultats	48
5.2. REGIME TRANSITOIRE « 2000-2016 ».....	53
5.2.1. Description du modèle	53
5.2.2. Résultats	54
5.3. SIMULATION D'UN SCENARIO DE POMPAGES AGRICOLES	57
5.3.1. Description du scénario simulé	57
5.3.2. Résultats	58
6. Conclusions et perspectives.....	61
7. Bibliographie.....	65

Liste des illustrations

Illustration 1 – Localisation de la zone d'étude.....	9
Illustration 2 – Chronogramme de l'étude (M : mission du BRGM en Haïti, L : livrables).	10
Illustration 3 – Bilan hydraulique des flux de la Plaine du Nord (Tomas, 1990c).	13
Illustration 4 –6 Carte piézométrique (Tomas, 1990c) révisée.	14
Illustration 5 – Extension du domaine modélisé sur fond de carte géologique.	17
Illustration 6 – Surface topographique du modèle (altitude en m).....	18
Illustration 7 – Carte de la base des alluvions (altitude en m).....	19
Illustration 8 – Carte des épaisseurs des alluvions (altitude en m).	19
Illustration 9 – Visualisation 3D du modèle hydrogéologique (les couleurs correspondent à l'altitude topographique de la surface, valeurs croissantes du bleu vers le rouge).	20
Illustration 10 – Conditions aux limites (en gris : charges imposées sur les limites d'affleurement, en rouge : charges imposées à 0 m sur la bordure littorale, en bleu : mailles de débordement).....	21
Illustration 11 – Recharge annuelle moyenne spatialisée au pas de 30 m (Adamson et al., 2016).	23
Illustration 12 – Zones de recharge du modèle (zones n° 1 à 5).	23
Illustration 13 – Bilan des débits dans un tronçon de rivière et différentes configurations d'échange modélisées par MARTHE.	24
Illustration 14 – Tracé des cours d'eau modélisés de façon explicite.	25
Illustration 15 – Exemple du calcul réalisé pour répartir les prélèvements par ouvrage.	26
Illustration 16 – Données de prélèvements AEP recueillies auprès de la DINEPA.	27
Illustration 17 – Répartition des prélèvements en nappe intégrés dans le modèle.....	27

Illustration 18 – Prélèvements annuels moyens par commune pour l'alimentation en eau potable.	28
Illustration 19 – Carte de localisation des stations hydro-climatiques et des sections jaugées par DAI.	30
Illustration 20 – Tableau récapitulatif des données de débit compilées à partir de la littérature.	31
Illustration 21 – Résultats des jaugeages réalisés par AVANSE entre janvier et juillet 2017.	31
Illustration 22 – Carte des zones humides et des zones inondables (CNIGS).	32
Illustration 23 – Tableau récapitulatif des valeurs de transmissivité et de perméabilité disponibles (en rouge : transmissivités calculés à partir des débits spécifiques).	33
Illustration 24 – Carte de localisation des zones d'intérêt du projet AVANSE.	34
Illustration 25 – Relation linéaire entre altitude topographique et niveau piézométrique.	35
Illustration 26 – Délimitation des zones de drainage amont pour le calcul des précipitations efficaces.	36
Illustration 27 – Précipitations efficaces annuelles calculées en amont du domaine modélisé.	36
Illustration 28 – Champ de perméabilité des alluvions à l'issue du calage en régime permanent (polygones bleu : zones résistantes superficielles, polygones rouge : zones résistantes profondes).	37
Illustration 29 – Diagrammes de dispersion pour la totalité des points d'observation (en haut) et pour les points AVANSE et BRGM (en bas). La droite en pointillé représente la droite d'équation $y = x$	39
Illustration 30 – Tableau comparatif entre charges hydrauliques simulées et observées.	39
Illustration 31 – Piézométrie de la nappe alluviale du Nord simulée en régime permanent.	40
Illustration 32 – Débits des rivières simulés vs débits mesurés sur le terrain.	41
Illustration 33 – Confrontation des zones de débordement simulées et des zones humides et inondables.	42
Illustration 34 – Principales composantes du bilan hydraulique de la nappe alluviale modélisée (en bleu les flux entrants, en vert les flux sortants).	43
Illustration 35 – Bilan hydraulique de la nappe alluviale par bassin versant.	44
Illustration 36 – Répartitions mensuelles de la recharge et des débits d'eau entrant par les limites amont pour le modèle transitoire « moyen ».	48
Illustration 37 – Évolution mensuelle des différents termes du bilan hydraulique de la nappe selon le modèle théorique transitoire « moyen ».	50
Illustration 38 – Évolution mensuelle du stockage / déstockage de l'aquifère alluviale selon le modèle théorique transitoire « moyen ».	51
Illustration 39 – Exemples de chroniques piézométriques simulées par le modèle théorique transitoire « moyen ».	52
Illustration 40 – Carte du battement annuel moyen de la nappe alluviale simulée par le modèle théorique transitoire « moyen ».	53
Illustration 41 – Évolution de la recharge météorique annuelle dans la configuration du modèle transitoire « 2000-2016 ».	54
Illustration 42 – Évolution cumulée du stock d'eau dans l'aquifère alluvial sur la période 2000-2016.	55
Illustration 43 – Exemples de chroniques piézométriques simulées par le modèle théorique transitoire « 2000-2016 ».	56
Illustration 44 – Carte piézométrique simulée par le modèle théorique transitoire « 2000-2016 » pour le mois de juin 2016.	56
Illustration 45 – Besoins en eau de la banane (source : FAO).	57

Illustration 46 – Évolution des prélèvements en nappe dans le cas du scénario relatif à l'irrigation des zones du projet AVANSE.	57
Illustration 47 – Impact des pompages agricoles sur la piézométrie de la nappe alluviale pour le mois d'août 2009.	58
Illustration 48 – Impact des pompages agricoles au droit des puits (diamètre = 1 m).	59
 Annexe - Comptes-rendus de mission	 67

1. Introduction

1.1. CADRE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

Le projet AVANSE, financé par USAID, vise à encourager un développement agricole durable dans le Nord et le Nord-Est d'Haïti. Le projet ambitionne de porter de 1500 ha à 4000 hectares (ha) la surface des terres agricoles dédiées aux cultures du riz, de la banane et du cacao. Les terres agricoles doivent être irriguées par des puits existants, par de nouveaux puits ou par des canaux d'irrigation réhabilités ou nouvellement construits.

Dans le but de déterminer si la ressource en eau souterraine mobilisable est suffisante pour le projet, il a été décidé d'établir un modèle hydrodynamique de la Plaine alluviale du Nord.

Suite à l'appel d'offres lancé par le projet AVANSE en date du 17/01/2017, le BRGM a été sélectionné pour apporter une assistance technique à la réalisation du modèle hydrodynamique. Il est, en effet, convenu que les travaux de modélisation soient conjointement pris en charge par l'Université de Port-au-Prince, DAI (maître d'œuvre du projet AVANSE) et le BRGM.

Les objectifs, initialement assignés au projet de modélisation, étaient de préciser :

- ✓ les limites hydrogéologiques du système, la présence des nappes, leurs profondeurs ;
- ✓ le bilan hydraulique de la plaine alluviale et les équilibres/déséquilibres entre les différents termes du cycle de l'eau ;
- ✓ l'impact quantitatif de l'irrigation sur les ressources souterraines ;
- ✓ les zones potentielles de débordement de la nappe qui affectent la surface agricole utile une partie de l'année.

Le périmètre de l'étude couvre les cinq bassins versants suivants (d'ouest en est) : Haut du Cap, Grande Rivière du Nord, Trou du Nord, Marion et Jassa (Illustration 1).

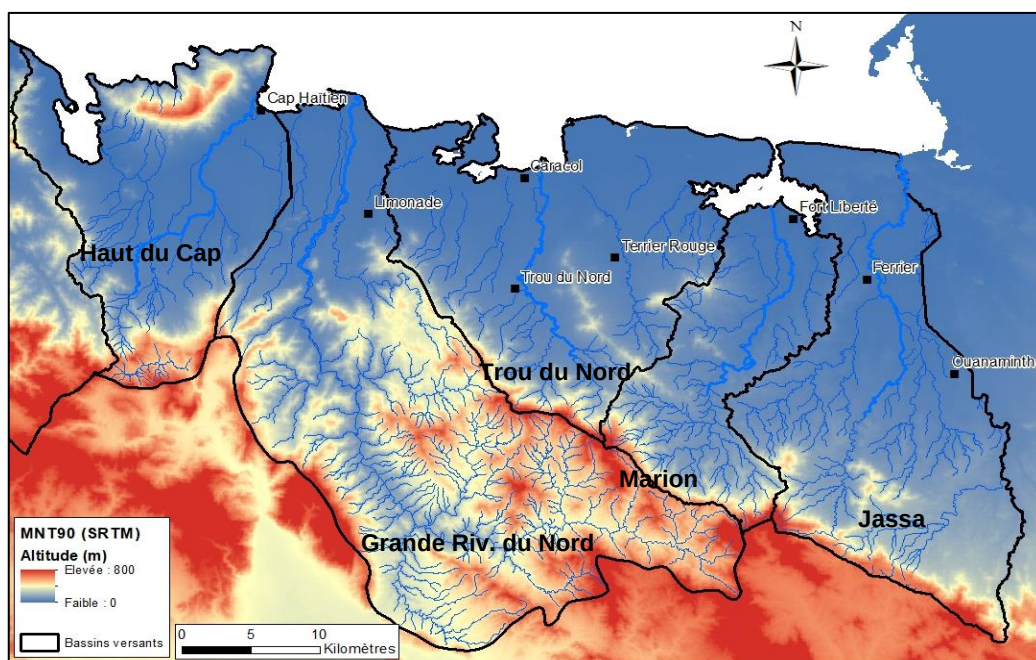


Illustration 1 – Localisation de la zone d'étude

1.2. DEROULEMENT DE L'ETUDE ET LIVRABLES

Le projet de modélisation s'est déroulé selon trois grandes étapes de travail.

La première étape, dédiée à la **formation à l'utilisation du logiciel MARTHE** et à l'**analyse des données collectées**, a fait l'objet d'un premier rapport (Livable 1, 30/06/2017). La formation s'est tenue du 12 au 16 juin 2017 dans les locaux de la Faculté d'Agronomie et de Médecine Vétérinaire (FAMV) de Port-au-Prince.

Six licences de MARTHE V7.6 ont été installées par le BRGM : deux sur des ordinateurs fixes de l'Université de Port-au-Prince, une sur un ordinateur portable de l'université de Limonade et trois sur des ordinateurs portables du projet AVANSE.

La seconde étape a été consacrée à la **construction du modèle hydrodynamique** de la plaine du Nord. Celle-ci a été initiée à Port-au-Prince du 10 au 15 juillet 2017 et terminée par le BRGM au cours du mois d'août, tout en maintenant les échanges techniques avec DAI et l'Université (Cf. § 3).

Dans un troisième temps, il a été procédé au **calage du modèle en régime hydraulique permanent**. Pour ce faire, le groupe de travail s'est réuni à l'Université de Port-au-Prince du 25 au 30 septembre 2017 ; le BRGM s'est chargée de finaliser le calage pour la fin du mois d'octobre. En complément, deux modèles théoriques en régime transitoire ont été livrés (Cf. § 4 et 5).

Enfin, même si cette tâche n'était pas inscrite au cahier des charges de la convention qui lie DAI et le BRGM, un appui a été apporté à la **mise en œuvre de scénarios d'exploitation** du modèle (Cf. § 5).

Pour chaque mission du BRGM en Haïti, un compte-rendu a été établi, ils sont reportés en Annexe 1.

Conformément au programme contractuel, les livrables suivants ont été fournis :

- ✓ Livable 1 : rapport relatif à l'analyse des données collectées et au déroulement de la formation (30/06/2017) ;
- ✓ Livable 2 : construction du modèle, installation sur les ordinateurs du projet et de l'Université de Port-au-Prince (31/08/2017) ;
- ✓ Livable 3 : calibration du modèle et livraison (31/10/2017) ;
- ✓ Livable 4 : rapport final (objet du présent document) et installation définitive du modèle sur les ordinateurs du projet et de l'Université de Port-au-Prince (18/12/2017).

L'Illustration 2 présente le chronogramme détaillé de l'étude.

Tâches	Mois							
	mai-17	juin-17	juil-17	août-17	sept-17	oct-17	nov-17	déc-17
Collecte de données		L1						
Formation au logiciel MARTHE		M1						
Construction du modèle			M2	L2				
Calage du modèle					M3	L3		
Appui à la réalisation de scénarios d'exploitation du modèle								
Rapport final								M4 / L4

Illustration 2 – Chronogramme de l'étude (M : mission du BRGM en Haïti, L : livrables)

2. Synthèse hydrogéologique

Même si l'inventaire des données disponibles et la synthèse hydrogéologique ont fait l'objet d'un premier rapport, les principales connaissances acquises par le passé sont ici reprises dans le but de faciliter la compréhension des hypothèses de construction du modèle.

Sur la base de la bibliographie disponible (§ 7), les principaux enseignements à retenir des caractéristiques et du fonctionnement de la nappe alluviale de la Plaine du nord sont les suivants :

- Du point de vue géologique, la plaine du Nord correspond à un comblement du versant nord-est effondré du massif du Nord par des matériaux détritiques. La nature des alluvions déposées est très hétérogène comme en témoignent les logs géologiques consultés et la forte variabilité de la productivité des forages existants (Tomasi, 1990b) : alternance de sables, de graviers et d'argiles.

Les forages de reconnaissance réalisés en 1989/1990 dans le cadre du programme de développement et de gestion de la ressource en eau financé par le PNUD (Programme des Nations Unies pour le Développement) (Tomasi, 1990b), des variations rapides de faciès ont été mises en évidence, en lien avec la nature fluviale des alluvions. Les faciès les plus grossiers ont été rencontrés dans les anciens lits de Grande Rivière du Nord et de Trou du Nord. Au contraire, les faciès argileux semblent prédominer à Phaëton, Fort-Liberté, Terrier Rouge et Carrefour Oranger. Ces forages de reconnaissance sont venus confirmer les résultats des investigations géophysiques mises en œuvre par le BRGM en 1980 (BRGM, 1980) : zones de plus forte résistivité superficielle, associées aux alluvions plus grossières, dans les anciens lits des principales rivières de la région, en particulier Grande Rivière du nord et Trou du Nord avec les forages les plus productifs.

Dans ces secteurs, les formations sablo-graveleuses sont rencontrées jusqu'à des profondeurs comprises entre 10 et 30 m. Cette tendance à l'échelle de la plaine ne doit cependant pas faire oublier des variations de faciès importantes (formations lenticulaires, argileuses comme sableuses).

- Les alluvions qui composent la plaine du nord sont épaisses, l'épaisseur croît du sud vers le nord, avec plus de 300 m en bordure de l'océan (investigations géophysiques BRGM, 1980). Parmi les forages de reconnaissance réalisés en 1989/1990, seuls deux ont atteint le socle intrusif (à 42 et 63 m). La présence locale du socle à plus faible profondeur traduit l'existence de seuils entre les bassins de Trou du Nord, Terrier Rouge et Fort-Liberté. Ces derniers pourraient représenter un obstacle aux écoulements souterrains (Tomasi, 1990b).
- Au sud de la Plaine, le Massif du Nord est composé de formations volcaniques intrusives (rhyolites, dacites, andésites, diorites, gabbros, ...), roches par nature peu perméables (perméabilité de fissures). De nombreuses sources y sont exploitées, avec des débits moyens compris entre 0.05 et 1 l/s (Tomasi, 1990c). Des puits de grand diamètre sont également creusés dans l'horizon altéré superficiel (pour sa capacité de stockage). La productivité des forages interceptant l'horizon fissuré sous-jacent reste limitée (au maximum 1 l/s). L'hypothèse d'un ruissellement largement dominant sur le versant nord du massif apparaît très vraisemblable.
- La caractérisation géochimique des eaux souterraines réalisée par le BRGM dans la région de Cap Haïtien (Gutierrez et al., 2012) montre que la plaine alluviale est le siège d'un aquifère multicouches dont le niveau le plus superficiel est en conditions oxydantes (nappe libre). En revanche, les niveaux semi-profonds captés par les pompes à main (15-20 m de profondeur dans ce secteur) ainsi que les niveaux profonds sont des niveaux captifs, protégés par des couches argileuses ou silteuses. Les puits semi-profonds (15-20 m) et profonds (jusqu'à 100 m

de profondeur) bénéficient d'une bonne protection naturelle et d'une dénitrification en conditions réductrices.

- Les datations (gaz CFC-SF₆) et les analyses isotopiques nous apprennent que les eaux de la nappe alluviale sont anciennes (voire très anciennes) (Gutierrez et al., 2012). Le faciès géochimique des eaux est relativement homogène dans la profondeur, car aucun paramètre chimique ne les distingue notablement en fonction de la profondeur (exceptés les nitrates).
- Les analyses réalisées en octobre 2010 par le BRGM sur l'eau de la Grande Rivière du Nord qui traverse la plaine sur un axe nord-sud montrent sans ambiguïté que la rivière draine fortement l'aquifère en amont de Pont Parois (Gutierrez et al., 2012). Les compositions chimiques et isotopiques des eaux de la rivière sont, en effet, très proches de celles des eaux souterraines. Les eaux des rivières n'influencent donc pas les eaux souterraines, excepté peut-être localement et temporairement lors de crues.

En revanche, sur l'extrémité amont de la plaine, les fonds de vallées seraient topographiquement plus élevés que le niveau de la nappe phréatique ; l'écoulement des cours d'eau participerait ainsi à l'alimentation de la nappe par infiltration (Tomasi, 1990c).

- La piézométrie de la plaine alluviale, élaborée dans le secteur de Cap Haïtien, à partir de l'inventaire d'octobre 2010, montre un écoulement sud-nord avec un gradient de 0.3% (Gutierrez, 2010). La zone de Balan est une zone où le niveau de la nappe est déprimé. Malgré l'absence de pompage dans les forages AEP (Alimentation en Eau Potable) lors de l'inventaire, il apparaît une dépression piézométrique caractéristique des zones d'exploitation des eaux souterraines.

Tomasi (1990c) mentionne un gradient hydraulique de 0.2 à 0.8% sur la plaine. Par ailleurs, un suivi réalisé en 1978/1979 dans l'ouest de la plaine a révélé des fluctuations saisonnières de la nappe de 0.2 à 1 m sur la partie aval de la nappe alluviale et de 1 à 5 m au pied des reliefs. La profondeur moyenne de la nappe se situe entre 5 et 15 m à proximité du massif du Nord et au pied des reliefs présents entre les rivières Lamatry et Marion. La profondeur diminue ensuite progressivement vers le nord pour se retrouver entre 0.5 et 2 m d'épaisseur sur la bande côtière.

Des incohérences ont été remarquées sur la carte élaborée par Tomasi en 1990. Ainsi, après digitalisation de la carte par DAI, quelques modifications / compléments ont été apportés au tracé de certaines courbes isopièzes (Illustration 4). Cette révision s'appuie en partie sur les relevés piézométriques plus récents.

- Du fait de la présence de niveaux plus argileux superposés à des niveaux sableux la nappe peut localement être mise en charge avec notamment plusieurs forages artésiens en bordure littorale (Tomasi, 1990c).
- La productivité des ouvrages existants est variable, entre 10 et 30 l/s dans la région de Cap Haïtien, ce qui correspond à de bonnes productivités (Gutierrez, 2010).

Un premier bilan hydrologique annuel a été proposé par Tomasi (1990c) à l'échelle de la plaine du Nord. Ce bilan intègre non seulement l'aquifère de la plaine du nord mais également les bassins versants limitrophes dont les ruissellements contribuent à l'alimentation de la nappe alluviale. Il s'agit d'un bilan hydrologique, c'est-à-dire qu'il prend en compte à la fois les eaux souterraines et les eaux de surface. Comme précisé par l'auteur, les chiffres sont à considérer avec précaution, certains comme la part des eaux météoriques infiltrées étant estimés sur la base d'études réalisées dans d'autres plaines alluviales d'Haïti (Illustration 3).

Pour la compréhension du schéma de Tomasi, l'explication ci-après est nécessaire :

- l'aquifère alluvial reçoit de l'eau des précipitations directes sur sa surface et des ruissellements sur les massifs volcano-metamorphiques voisins. Sur ces derniers, les pluies efficaces représentent 30% des précipitations totales. Seule une très faible partie (2.3%) s'infiltre et est restituée au niveau des sources. 700 Mm³ d'eau sont donc dirigés vers l'aquifère alluvial par ruissellement superficiel (cours d'eau) ;
- sur la plaine, les pluies efficaces représentent seulement 20% des précipitations, qui sont plus faibles. L'apport est donc de 300 Mm³. Il s'ajoute aux 700 Mm³ provenant des massifs mais 10 Mm³ sont prélevés pour l'irrigation (soit un bilan des eaux de surface de 690 Mm³). La nature perméable des alluvions permet l'infiltration de 150 Mm³ à partir de la pluie (690 + 300 - 150 = 840 Mm³) et 100 Mm³ à partir de pertes des rivières dans la partie amont (840 - 100 = 740 Mm³). Dans la partie aval, les rivières drainent la nappe et récupèrent 140 Mm³ (740 + 140 = 880 Mm³) ;
- le total des entrées est donc de 700 (Ruissellement) + 300 (Pluies efficaces) = 1000 Mm³ ;
- le total des sorties est de 10 (irrigation) + 100 (évaporation directe) + 880 (écoulement vers la mer) = 990 Mm³ ;
- pour équilibrer le bilan, il faut supposer que 10 Mm³ partent de manière invisible vers la mer (pertes souterraines).

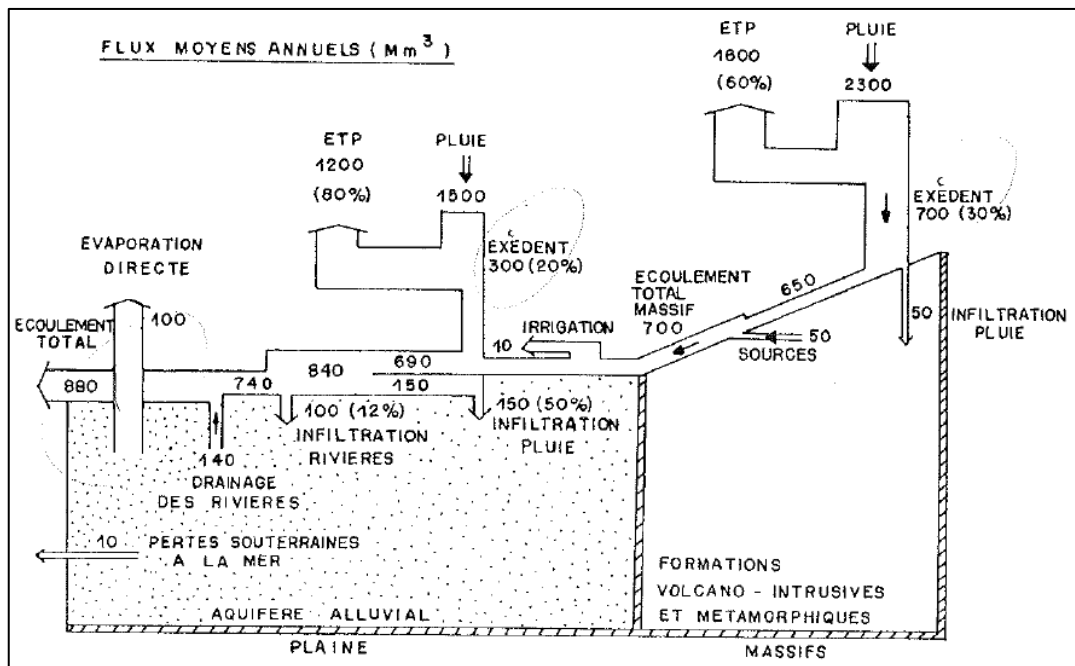


Illustration 3 – Bilan hydraulique des flux de la Plaine du Nord (Tomasi, 1990c)

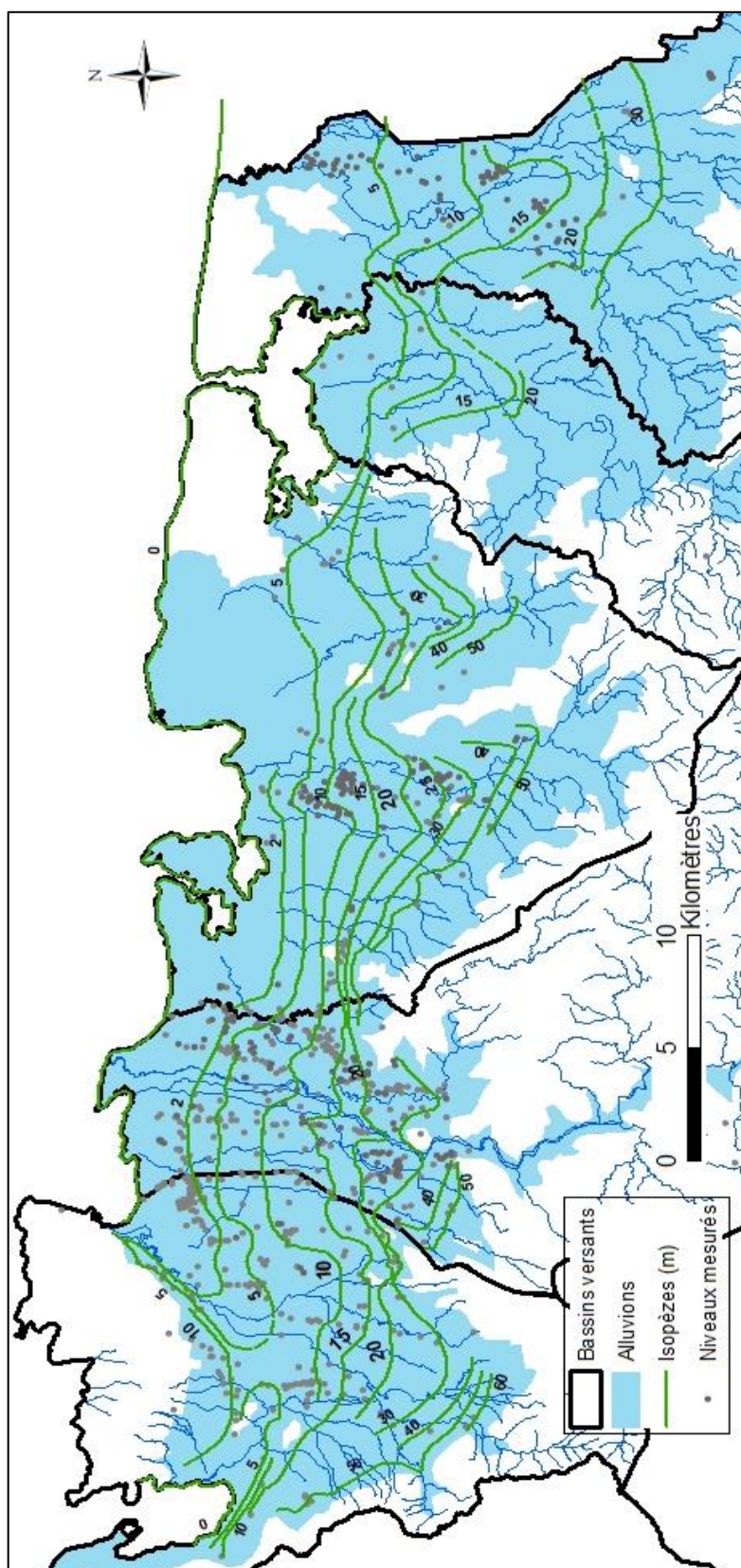


Illustration 4 – Carte piézométrique (Tomasi, 1990c) révisée

3. Construction du modèle hydrodynamique de la Plaine du Nord

3.1. LE CODE DE CALCUL MARTHE

Le logiciel MARTHE (Thiéry, 1990) est développé au BRGM depuis plus de 30 ans. Une documentation détaillée est proposée sur le site internet du BRGM : <http://www.brgm.fr/production-scientifique/logiciels-scientifiques/marthe-logiciel-modelisation-ecoulements>.

La documentation complète a été transmise à DAI et à l'Université de Port-au-Prince lors de l'installation du logiciel.

Le code de calcul MARTHE (Modélisation d'Aquifères par maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Ecoulements) permet le calcul des écoulements de fluides et de transfert de masse et d'énergie en milieux poreux tridimensionnels avec une approche en volumes finis (Différences Finies Intégrées) en établissant l'équation d'équilibre des débits entre la maille de calcul et les six mailles voisines (Nord, Sud, Est et Ouest appartenant à la même couche, puis Haut et Bas des couches sus- et sous-jacentes dans le cas d'un modèle multicouche).

Dans chaque maille, l'équation suivante est respectée :

$$\sum_{i=1}^6 T_i \cdot (H_i - H_t) + Q + Rech.Surf = S.Surf \cdot \left(\frac{H_t - H_{(t-dt)}}{dt} \right)$$

Avec T_i le coefficient d'échange global (« transmissivité ») entre la maille de calcul et une maille voisine i , H_i la charge d'une maille voisine à la date t , H_t la charge de la maille de calcul à la date t , Q le débit prélevé ou injecté dans la maille, $Rech$ le flux de recharge, $Surf$ la surface horizontale de la maille, et S le coefficient d'emménagement.

On obtient ainsi un système d'équations linéaires conduisant à une matrice creuse. Plusieurs algorithmes de résolution par gradients conjugués sont proposés pour résoudre ce système d'équations : gradients conjugués avec pré-conditionnement de Choleski, méthode Eisenstat. Compte tenu de la non-linéarité due au fait que les coefficients T_i dépendent des charges hydrauliques, la résolution se fait de manière itérative. Cette schématisation en volumes finis fait intervenir des mailles organisées en couches empilées, chaque couche étant formée de mailles organisées en lignes et colonnes. Les schémas peuvent être simples ou complexes (zone non saturée, écoulement multiphasique, prise en compte de la densité du fluide, prise en compte de la végétation, interaction avec des cours d'eau, transferts d'énergie, etc.).

La convergence des calculs itératifs est contrôlée par plusieurs critères, principalement les écarts de charge moyens et maximaux entre deux itérations successives et les débits résiduels d'erreur (global sur l'ensemble du modèle et ponctuel dans chacune des mailles). En pratique, l'état de convergence d'un modèle est principalement évalué par des indicateurs portant sur le bilan hydraulique des différentes couches, et plus particulièrement sur le déséquilibre de bilan dans chaque maille, chaque couche, et pour l'ensemble du modèle.

En régime transitoire, la modélisation fait intervenir deux coefficients d'emmagasinement : le coefficient d'emmagasinement en nappe libre (équivalent à la porosité efficace) lorsque la maille n'est pas entièrement saturée en eau, et le coefficient d'emmagasinement captif lorsque la maille est saturée en eau.

La nappe peut s'assécher localement et se re-saturer ultérieurement. Elle peut également déborder.

Le modèle permet de prendre en compte les échanges entre un réseau hydrographique et les nappes sous-jacentes.

L'interface graphique Win-MARTHE est utilisée en pré- et post-processeur pour la préparation et la mise en forme des données, ainsi que pour la visualisation des données et des résultats.

3.2. STRUCTURE ET EMPRISE DU MODELE

3.2.1. Maillage et extensions

En concertation avec DAI, il a été décidé de retenir un maillage uniforme sur l'ensemble du domaine modélisé. Celui-ci est constitué de **mailles carrées de 200 m de côté**.

La taille des mailles a avant tout été justifiée par la nécessité de ne pas trop dégrader la définition du modèle numérique de terrain (pas de 25 m, § 3.2.2). À l'échelle de la plaine alluviale, des mailles de 500 m de côté aurait, en effet, pu suffire compte tenu de la faible densité des informations disponibles.

Suite à plusieurs tests, l'aquifère alluvial est finalement représenté par un **modèle monocouche**. Une structure schématique à trois couches, visant à distinguer une nappe superficielle libre, une nappe profonde captive et un horizon argileux intercalé, a été testée. Cependant, cette approche n'a pas apporté de plus-value du point de vue de la représentation des écoulements souterrains ; en outre, au regard du peu de données disponibles, en particulier d'ordre géologique, les inconnues relatives à la géométrie des couches étaient augmentées.

Au nord, le modèle est limité par les limites d'affleurement des alluvions et par le trait de cote. Vers le sud, le domaine modélisé ne couvre pas toujours la totalité des alluvions mais s'étend jusqu'aux pieds des reliefs.

L'extension, initialement basée sur les contours de la carte géologique d'Haïti, a été révisée en cours de construction du modèle. En effet, la cartographie des alluvions présente certaines incohérences comparativement à la topographie. Vers le sud, il a finalement été choisi d'étendre le modèle jusqu'au pied des fortes pentes. Quelques modifications des contours initiaux ont également été apportées sur les limites au nord et sur les intrusions de socle (Illustration 5). Des erreurs de géoréférencement de quelques points d'observation de 1990 pourraient être à l'origine des non correspondances entre certains contours de la carte géologique et le modèle numérique de terrain.

Enfin, vers l'est, le modèle a été étendu au-delà de la frontière dans le but de s'appuyer sur une limite physique, à savoir la limite du bassin versant des rivières Jassa et Massacre (Illustration 5).

Au total, **le modèle est composé de 20 431 mailles, soit une superficie équivalente d'environ 817 km²**.

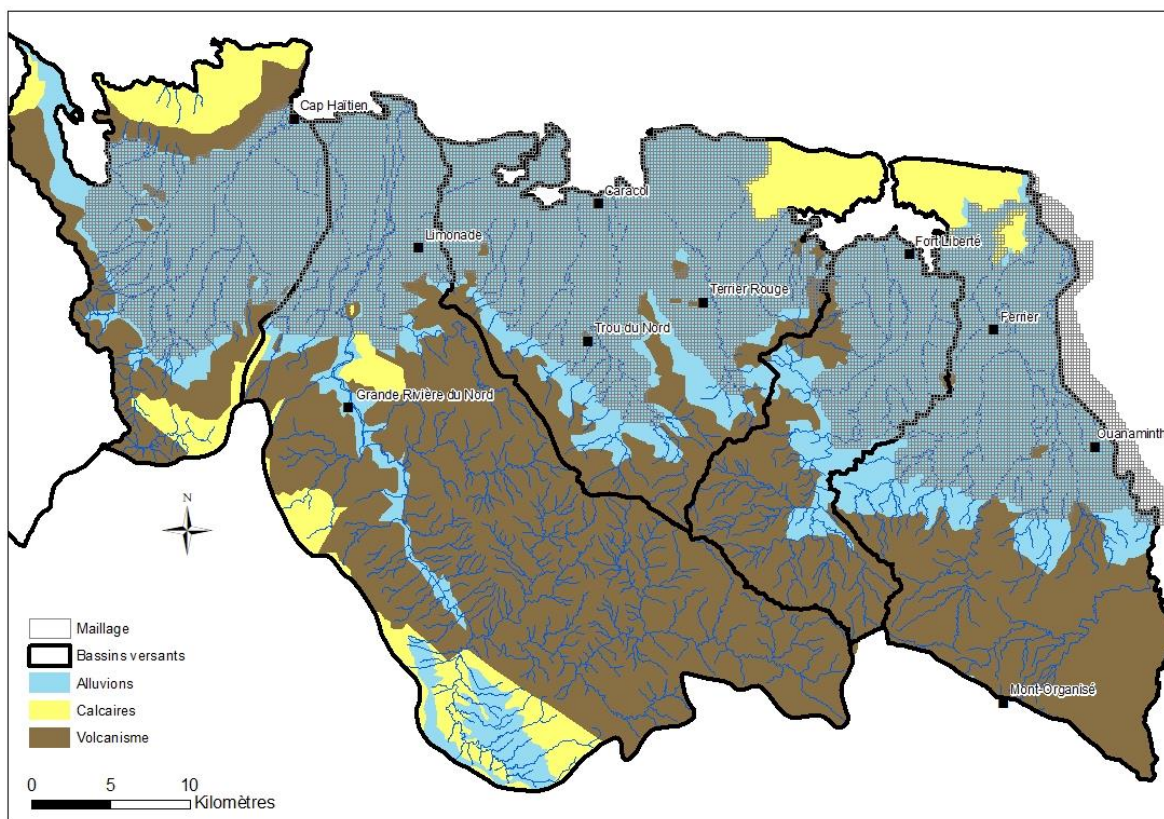


Illustration 5 – Extension du domaine modélisé sur fond de carte géologique

3.2.2. Géométrie de l'aquifère alluvial

Toit de l'aquifère alluvial

Le toit de la couche modélisée correspond à la topographie de la plaine alluviale.

Après pré-traitement et analyse des trois MNT¹ disponibles, il a été décidé de retenir un MNT au pas de 5 m transmis par l'intermédiaire du BRGM (rééchantillonnage de données Lidar réalisé par le BRGM dans le cadre d'études relative au risque sismique en Haïti) et le MNT au pas de 90 m (SRTM) pour les extrémités amont de la plaine non couverte par le Lidar. En effet, le MNT au pas de 5 m dont dispose le BRGM ne couvre pas la totalité de la plaine alluviale.

Le pré-traitement consiste à corriger les possibles imperfections des données (remplissage des cuvettes notamment), et à calculer les directions de flux et les accumulations de flux.

Le MNT au pas de 5 m a finalement été rééchantillonné au pas de 20 m afin d'alléger les fichiers à importer dans MARTHE.

¹ Modèle Numérique de Terrain = surface topographique numérique

Lors du passage aux mailles de 200 m du modèle hydrogéologique, les valeurs moyennes du MNT sont importées, excepté pour le réseau hydrographique où les valeurs minimums sont considérées. Dans les fonds de vallées, il est, en effet important que la cote de débordement (= cote topographique) soit proche du niveau des rivières (Cf. § 3.3).

L'ensemble des opérations liées au pré-traitement des MNT, réalisées sous ArcGis©, a été décrit dans un document transmis à l'équipe de projet.

Dans le modèle, les altitudes topographiques varient entre 0.15 m et 72 m, pour une valeur moyenne de 19 m (Illustration 6).

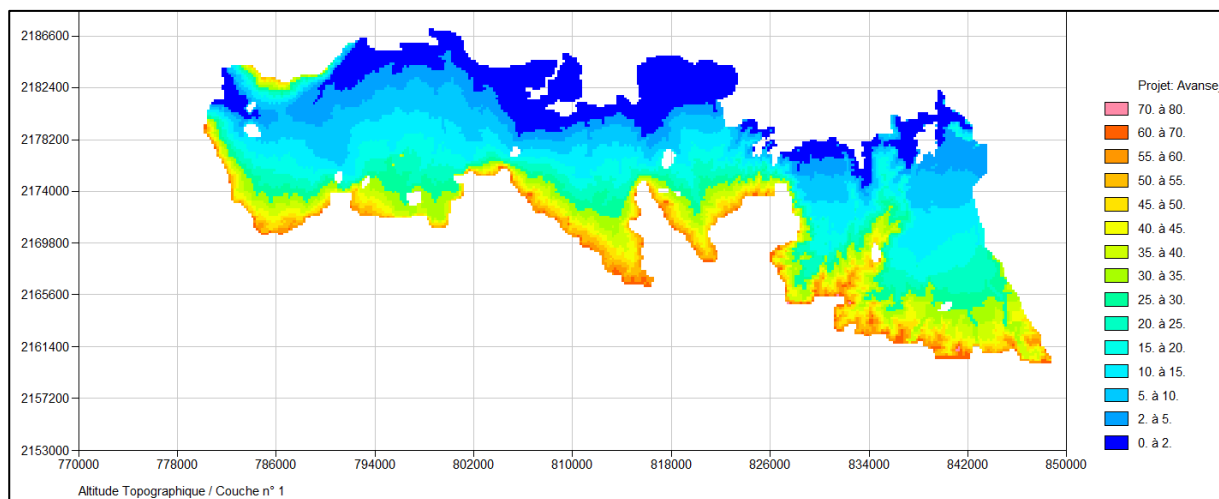


Illustration 6 – Surface topographique du modèle (altitude en m)

Mur de l'aquifère alluvial

Compte tenu de la très forte hétérogénéité des faciès en présence (argile, sable, gravier) et des rapides variations latérales de faciès (géométries lenticulaires), il avait été conclu à l'impossibilité de réaliser un modèle géologique 3D des alluvions au regard du peu d'information géologique disponible (Arnaud, 2017).

Néanmoins, les investigations géophysiques conduites par le BRGM en 1980, couplées aux données de forage, ont permis d'établir une carte de profondeur du substratum des alluvions à l'échelle de la Plaine du Nord (Radstake, 1990²). Un total de 588 sondages électriques a été mis en œuvre et interprété par le BRGM. Les niveaux argileux sont caractérisés par de faibles valeurs de résistivité (5 à 10 ohm.m) tandis que les niveaux plus sableux sont associés à des résistivités plus élevées (> 20 ohm.m). La signature géoélectrique du substratum est quant à elle caractérisée par une résistivité de l'ordre de 200 ohm.m.

La carte des isobathes du substratum, disponible au format papier dans le rapport de Tomasi (1990), a été digitalisée puis krigée³ sous ArcGis (méthode linéaire) avant importation dans MARTHE. Faute d'information en bordure littorale, la profondeur de la base des alluvions a été limitée à 300 m ; cette valeur correspond à la dernière courbe de niveau mentionnée sur la carte.

² Rapport non consulté

³ Méthode d'interpolation géostatistique adaptée à la reconstitution de surfaces topographiques ou piézométriques.

Les cotes altimétriques de la base des alluvions modélisées varient entre -300 m et 24 m, pour une valeur moyenne de -122 m (Illustration 7).

L'épaisseur des alluvions varie quant à elle entre 36 et 300 m, pour une valeur moyenne de 141 m (Illustration 8).

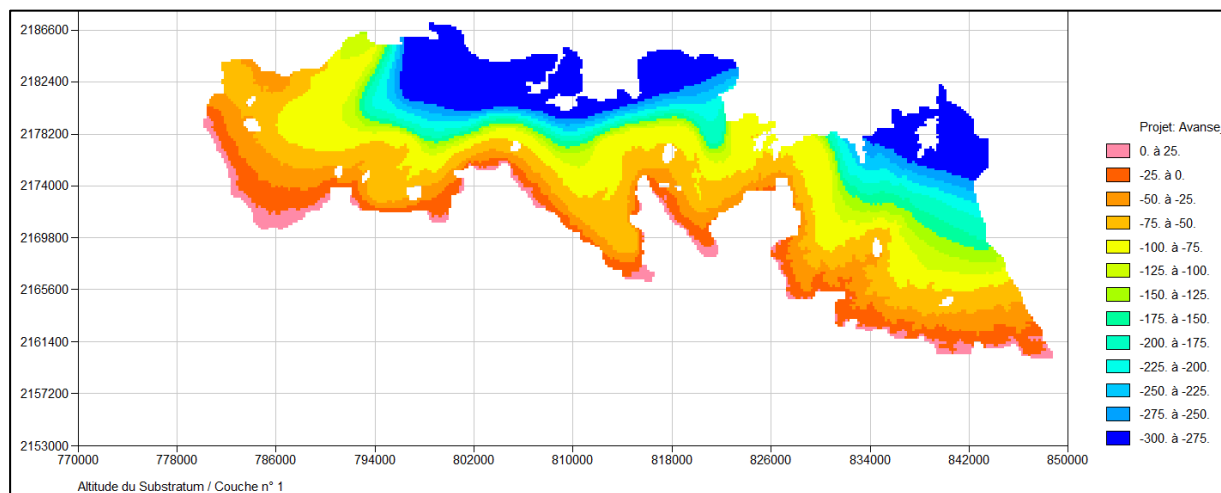


Illustration 7 – Carte de la base des alluvions (altitude en m)

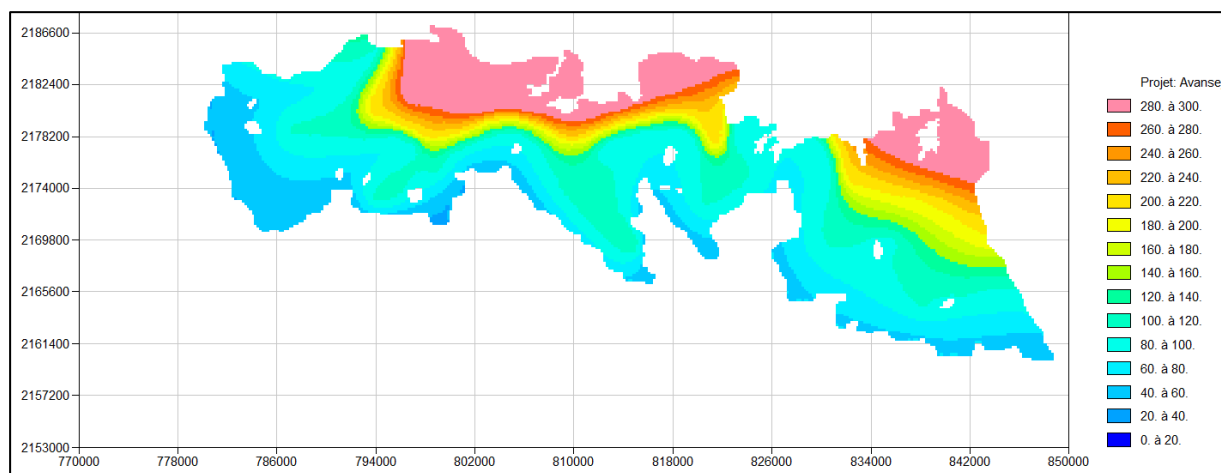


Illustration 8 – Carte des épaisseurs des alluvions (altitude en m)

L'Illustration 9 présente une visualisation 3D du modèle hydrogéologique de la Plaine du Nord. Elle illustre l'épaississement de la formation alluviale vers le nord, c'est-à-dire vers la mer. La remontée du socle est bien exprimée du côté de Fort-Liberté, en revanche, à l'extrémité nord-est du modèle, l'épaisseur supérieure à 200 m pourrait être surestimée localement. Faute d'informations contradictoires à la carte des isobathes, nous nous sommes appuyés sur cette dernière pour réaliser ce premier modèle.

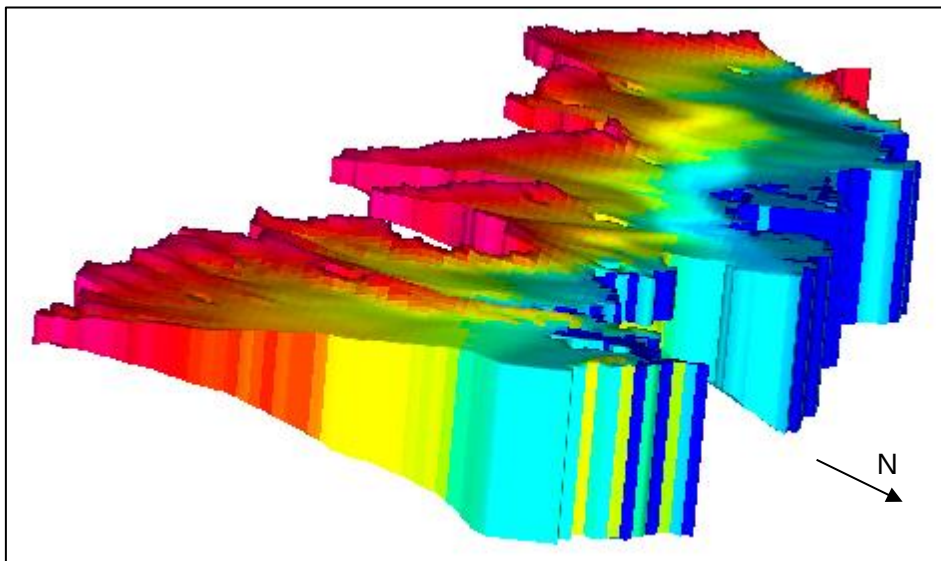


Illustration 9 – Visualisation 3D du modèle hydrogéologique (les couleurs correspondent à l'altitude topographique de la surface, valeurs croissantes du bleu vers le rouge)

3.3. CONDITIONS HYDRAULIQUES AUX LIMITES DU MODELE

Il est impératif de fournir au logiciel de modélisation les conditions hydrauliques aux limites du modèle, de façon à ce que celui-ci puisse correctement intégrer l'influence du « monde extérieur » (règles d'échange entre le domaine modélisé et le milieu extérieur).

Les conditions aux limites introduites dans le modèle sont de trois types (Illustration 10) :

- **À charge imposée** :
 - le long du trait de côte avec une charge hydraulique imposée à 0 m (limite aval). On impose de telles conditions (dites de Dirichlet) sur une limite où la charge hydraulique est indépendante des conditions de circulation dans la nappe. C'est par exemple le cas pour le contact d'une nappe avec la mer ;
 - sur les limites d'affleurement des alluvions, aux contacts avec les formations calcaires ou volcaniques. Les charges ainsi imposées permettent de traduire l'alimentation de la nappe alluviale par les formations encaissantes (ruissellement + apports souterrains). Les débits échangés avec l'amont sont discutés plus en détail dans la suite du rapport (§ 4.2.2 et 4.3.5).
- **À flux nul** sur les limites latérales qui correspondent à des lignes de courant (par définition, aucun flux ne traverse une ligne de courant).
- **À débordement** sur toute l'emprise des alluvions. Si la charge calculée dans une maille est supérieure à la cote de débordement assignée à cette maille (toit de l'aquifère alluvial = topographie dans notre cas), il y a débordement et la charge effective est ramenée à la cote du sol, l'excès de charge étant converti en débit de débordement.

En régime transitoire, les charges imposées sur les limites d'affleurement sont remplacées par des flux imposés (§ 5).

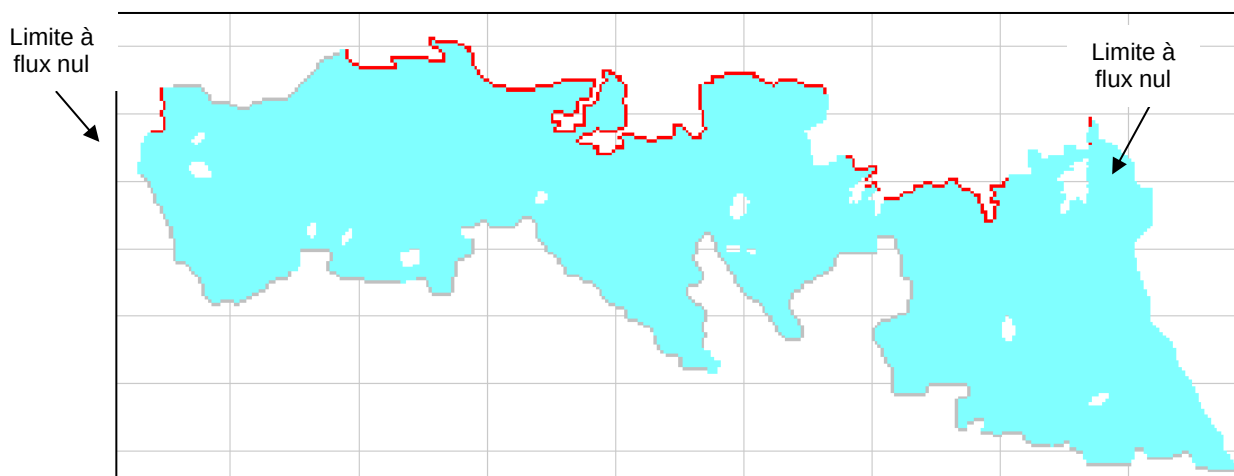


Illustration 10 – Conditions aux limites (en gris : charges imposées sur les limites d’affleurement, en rouge : charges imposées à 0 m sur la bordure littorale, en bleu : mailles de débordement)

3.4. ZONES DE RECHARGE

3.4.1. Données climatiques disponibles

Précipitations

De nombreuses données de précipitation ont été compilées, anciennes comme plus récentes, mais il n’a pas été possible de reconstituer des chroniques continues sur de longues durées et comparables entre elles d’une station à l’autre.

Les données relevées sur les sept pluviomètres installés dans le cadre du projet AVANSE n’ont pas pu être exploitées car elles se sont révélées trop partielles : au maximum, 5 mois de données semblent disponibles sur 2 ou 3 stations. Par ailleurs, celles-ci n’étant toujours pas validées à l’issue de la troisième mission du BRGM, il n’était de toute façon pas envisageable de les valoriser dans le cadre du projet de modélisation.

En complément, le BRGM a récupéré les pluies journalières mesurées par radar météorologique et mis à disposition sur le site du LAFDM⁴ : <http://stream.princeton.edu/LAFDM/WEBPAGE>. Cependant, ces données apparaissent très différentes de celles disponibles au sol. De plus, la variabilité climatique de la Plaine du Nord n’est pas retranscrite par ces pluies satellitaires. Il a donc été décidé de ne pas utiliser ces données.

Dès sa première mission à Port-au-Prince, le BRGM a alerté sur cette lacune d’informations climatiques, particulièrement préjudiciable dans un projet de modélisation (Cf. livrable 1 + comptes rendus de mission, Annexe 1).

⁴ Latin American Flood and Drought Monitor

Ce n'est finalement que lors de la troisième mission (fin septembre 2017) que des données mensuelles plus récentes ont été récupérées pour trois pluviomètres de la Plaine du Nord : Cap Haïtien, Terrier Rouge et Ouanaminthe. Aucune information de ce type n'a été collectée en amont de la plaine.

En définitive, aucune chronique de précipitation journalière d'une durée suffisante (au moins une année complète) n'a pu être récupérée.

Evapo-Transpiration Potentielle (ETP)

Concernant l'ETP, seules des valeurs moyennes mensuelles, relatives à des périodes anciennes (1920-1940), ont été retrouvées.

En novembre 2017, de nouvelles données issues du FAO ont été mises à disposition du projet. Celles-ci ont pu être valorisées dans les modèles théoriques construits en régime transitoire (Cf. § 5).

Conclusions

Face à la difficulté d'accéder à des données climatiques homogènes et récentes, il n'a pas été possible de procéder au calcul des bilans hydro-climatiques au sein du modèle. Il a donc été décidé d'utiliser la carte nationale de la recharge établie par Adamson et al. (2016).

Néanmoins, les données de pluie et d'ETP collectées ont permis de faire des calculs de précipitations efficaces⁵ au pas de temps mensuel, dans le but de vérifier la cohérence des débits d'échange simulés entre la plaine alluviale et le milieu extérieur (sur les limites à charge imposée, Cf. § 4.2.2).

Enfin, comme conclu par le BRGM dans son compte-rendu de mission n° 3, l'absence de chroniques de données climatiques au pas de temps journalier **n'autorise pas un calage du modèle en régime transitoire**. Ceci est d'autant plus vrai en l'absence de chroniques piézométriques et débitmétriques comme nous allons le voir plus loin (§ 4.1.2 et § 4.1.3).

3.4.2. Définition des zones de recharge

L'évaluation de la recharge annuelle moyenne, proposée par Adamson et al., 2016, repose sur le croisement cartographique des précipitations moyennes, de la géologie, de la pente et de la couverture végétale. Une extraction du raster au pas de 30 m sur la plaine alluviale a été fournie par J. Adamson (Cf. Illustration 11). Ces données reproduisent bien la forte variabilité climatique qui est observée à l'échelle de la Plaine du Nord. Par ailleurs, on peut remarquer une bonne concordance avec les zones climatiques délimitées par le BDPA en 1983 (Bureau pour le Développement de la Production Agricole) :

- Zone A : Aride - pluviométrie moyenne annuelle inférieure à 1000 mm avec 2 saisons sèches : juillet à août et décembre à mars. La température annuelle moyenne varie entre 25 et 27 °C.
- Zone O : Moyen - pluviométrie moyenne annuelle comprise entre 1100 et 1300 mm avec une saison sèche hivernale et une petite saison sèche en juillet. La température annuelle moyenne varie entre 22 et 26 °C.

⁵ Part des précipitations disponibles à l'écoulement (ruissellement + infiltration)

- Zone H : Humide - Pluviométrie moyenne annuelle comprise entre 1400 et 2200 mm avec une saison sèche hivernale et une saison sèche moins marquée en juillet-août. La température annuelle moyenne varie entre 22 et 26 °C.

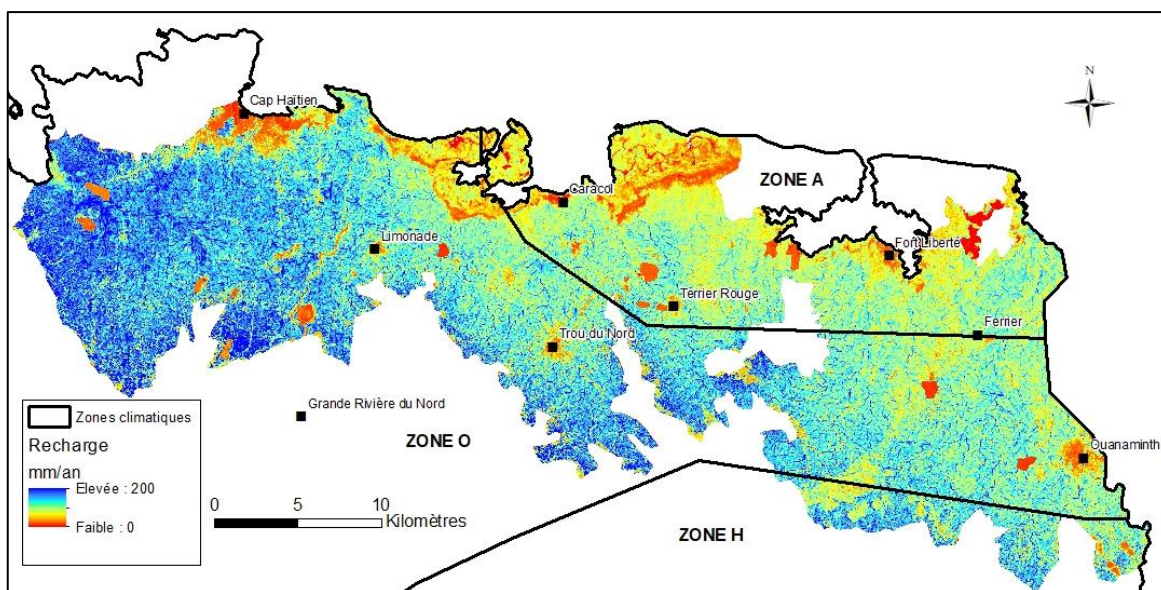


Illustration 11 – Recharge annuelle moyenne spatialisée au pas de 30 m (Adamson et al., 2016)

Sur la base de la recharge spatialisée et des zones climatiques, le domaine modélisé a été découpé en **cinq zones de recharge distinctes** (notation de 1 à 5, Illustration 12). Toutes les mailles d'une même zone reçoivent un flux de recharge identique.

Pour démarrer le processus de calage, la valeur moyenne calculée à partir de la grille au pas de 30 m a été affectée à chacune des zones, soit 100 mm / an pour les zones n° 1 et 2, 250 mm pour la zone n° 3, 200 mm pour la zone n° 4 et 170 mm pour la zone n° 5.

Ces valeurs seront par la suite ajustées en phase de calage du modèle (§ 4).

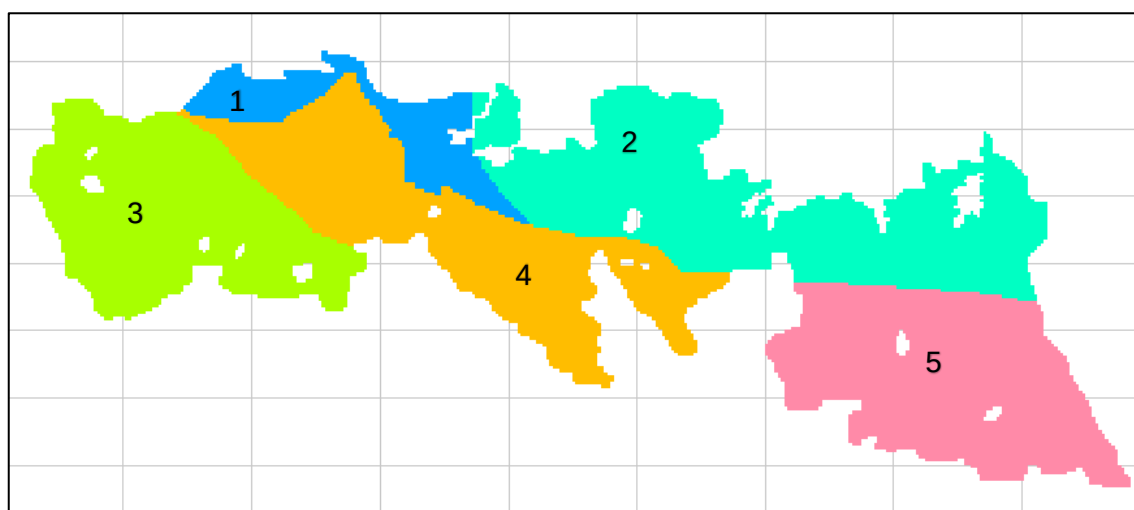


Illustration 12 – Zones de recharge du modèle (zones n° 1 à 5)

3.5. REPRESENTATION DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE

Les **cinq principaux cours d'eau traversant la plaine alluviale** (Haut du Cap, Grande Rivière du Nord, Trou du Nord, Marion et Jassa) **ont été explicitement modélisés**, en tant qu'entité hydraulique bien individualisée. Il s'agit du degré de conceptualisation le plus avancé en termes de caractérisation des échanges nappe-rivière.

Le réseau hydrographique, qui se superpose alors au maillage de surface, est composé d'un système arborescent de tronçons de rivières organisés en affluents. Un tronçon constitue en fait une « maille rivière » en relation avec une maille du modèle d'écoulement souterrain.

Dans chaque affluent, les données de rivière sont définies par tronçon. L'arbre de branchement agence les affluents entre eux pour former le réseau hydrographique. Un tronçon est décrit par sa géométrie (longueur, largeur, et altitude du lit), par ses propriétés physiques (épaisseur et perméabilité du lit et des berges), par ses termes sources (pompages ou injections) et par son état (hauteur d'eau dans la rivière).

Selon la position relative de la ligne d'eau dans la rivière et de la surface libre dans l'aquifère, un débit peut être échangé depuis un tronçon de rivière vers l'aquifère, ou réciproquement depuis l'aquifère vers la rivière (Illustration 13). Le débit d'échange est contrôlé par le lit et les berges du cours d'eau en fonction de leur surface, épaisseur et perméabilité.

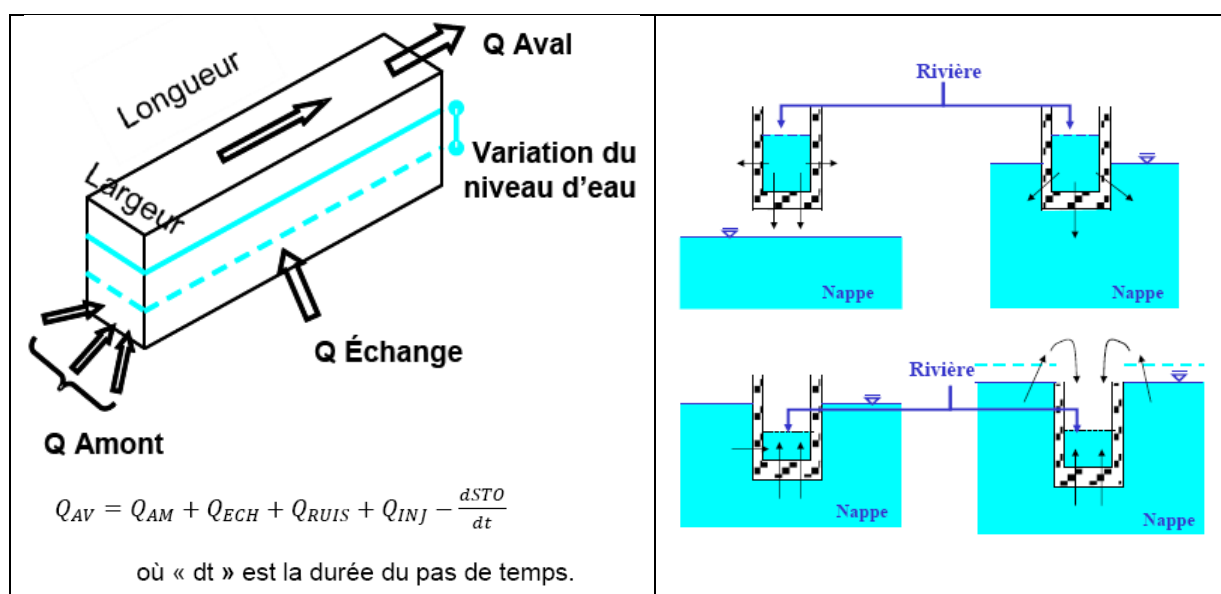


Illustration 13 – Bilan des débits dans un tronçon de rivière et différentes configurations d'échange modélisées par MARTHE

Ce choix avait en partie été justifié par la réalisation de profils topographiques en travers des cinq cours d'eau concernés. Les levés n'ont, cependant, pu être effectués dans des délais compatibles avec le projet de modélisation. En l'absence de données mesurées sur le terrain, les approches suivantes ont été adoptées :

- digitalisation par DAI des cinq rivières sur la base des photographies aériennes 2010. Le tracé obtenu a été importé dans MARTHE ; plusieurs modifications ont ensuite dû être apportées, notamment pour rester en cohérence avec la surface topographique du modèle (Cf. tracé final dans le modèle, Illustration 14) ;

- longueurs de chaque tronçon (chaque maille rivière) : évaluation par jointure spatiale sous QGIS entre le linéaire des cours d'eau digitalisé et le maillage du modèle ;
- largeurs des tronçons : calcul sous ArcGis des profils en travers à partir du MNT au pas de 5 m en différents points des cours d'eau et affectation manuelle des valeurs dans le modèle ;
- cotes du fil d'eau dans chaque tronçon : valeur de la cote topographique de la maille moins 1 m ;
- cotes du fond : affectation d'une valeur uniforme par cours d'eau à partir des informations issues des sections jaugées par DAI (hauteurs d'eau de 0.4 m pour la rivière Haut du Cap, 0.6 m pour la Grande Rivière du Nord, 0.25 m pour Trou du Nord, 0.35 m pour la Marion et 0.3 m pour la Jassa) ;
- perméabilité de colmatage du lit et des berges : valeur uniforme de 1.10^{-6} m/s ;
- épaisseurs de colmatage : valeur uniforme de 1 m.

Étant donné les déplacements possibles des lits des rivières par le passé, les nombreux drains aménagés et une topographie très plane, la digitalisation des cinq principaux cours d'eau s'est avérée particulièrement délicate. L'expertise de DAI a toutefois permis de trouver un bon compromis entre les photographies aériennes et les réalités du terrain.

En complément de ces paramètres, un débit amont doit être renseigné pour le « tronçon source » de chacun des cinq cours d'eau (première maille rivière). À défaut de chroniques de débits disponibles en amont de la plaine, les débits amont ont été approchés par un calcul de précipitations efficaces sur le bassin de drainage de chaque maille amont. Le calcul est détaillé au paragraphe 4.2.2.

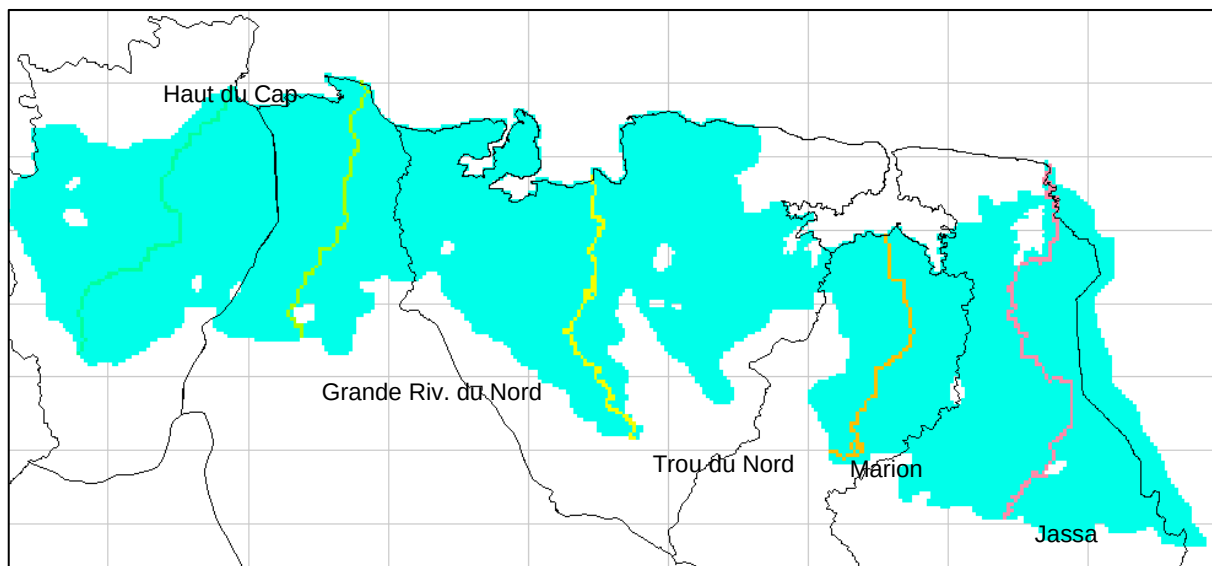


Illustration 14 – Tracé des cours d'eau modélisés de façon explicite

Le **réseau hydrographique secondaire a été modélisé par l'intermédiaire de mailles à débordement** (cote de débordement = cote minimale du MNT au pas de 5 m importé). Il est rappelé que le débordement est autorisé sur toute l'emprise du modèle. Cette configuration n'autorise que des échanges de la nappe vers le cours d'eau (drainage de nappe uniquement).

Les flux de débordement rejoignent ensuite par ruissellement une des rivières modélisées en fonction de la surface topographique. En effet, MARTHE permet de générer des directions de ruissellement à partir des altitudes topographiques. Chaque maille se voit affectée d'un code (compris entre 1001 et 1008) décrivant la direction aval de ruissellement.

3.6. PRELEVEMENTS

Aucune information n'a pu être récupérée par DAI concernant les **prélèvements en rivière**. Ceux-ci n'ont, par conséquent, pas été considérés dans le modèle. Les périmètres irrigués en fonctionnement par le passé et évoqués dans plusieurs études ne seraient plus en service en raison de la dégradation des différents barrages (OXFAM, 2011).

Pour les **prélèvements en nappe**, trois usages peuvent être distingués : l'alimentation en eau potable (AEP), l'irrigation ainsi que l'usage industriel (parc industriel de Caracol, distillerie Larue, fabrique de glace, purificateurs d'eau, etc.).

L'alimentation en eau potable se fait par l'intermédiaire de quelques forages profonds et de très nombreux semi-profonds (pompes à bras). Dans le but d'aboutir à une évaluation moyenne de la production, trois informations principales ont été croisées : la répartition de la population par commune, la consommation moyenne en eau par habitant et la base de données des points d'eau d'Haïti Outreach.

Concernant la consommation, une distinction a été faite entre les zones rurales (20 l/jour/hab.) et les zones urbaines (70 l/jour/hab.) ; ces chiffres sont issus d'un Fascicule technique de la DINEPA (Direction Nationale de l'Eau Potable et de l'Assainissement) daté de 2013. Les zones urbaines ont été délimitées à partir des photographies aériennes.

Chaque puits, répertorié comme fonctionnel dans la base de données d'Haïti Outreach, s'est finalement vu attribué un prélèvement annuel moyen comme décrit par le schéma suivant (Illustration 15) :

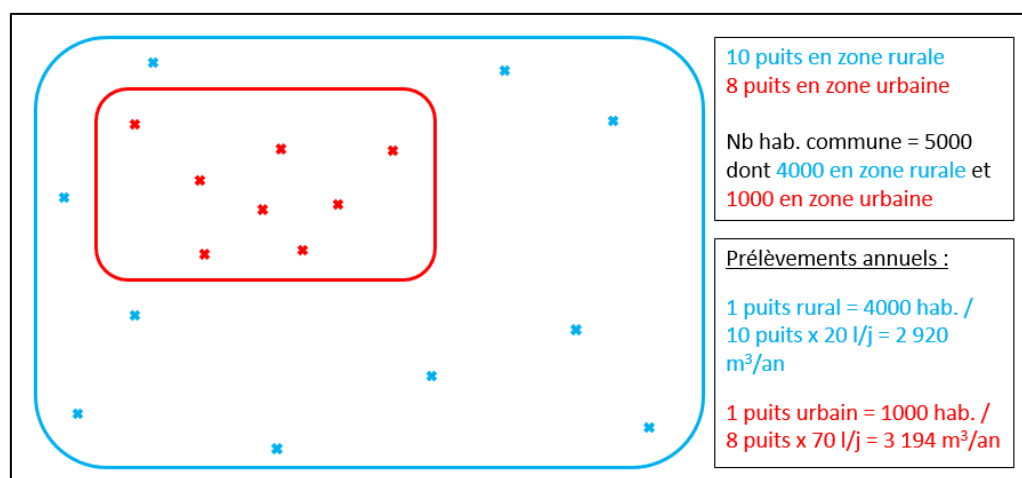


Illustration 15 – Exemple du calcul réalisé pour répartir les prélèvements par ouvrage

En complément, les étudiants de l'Université de Port-au-Prince ont rencontré la DINEPA à Cap Haïtien. Des informations plus précises ont ainsi pu être collectées pour les principaux forages des communes de Cap Haïtien et de Ouanaminthe à l'est du domaine modélisé (Illustration 16). Pour ces deux communes, les volumes indiqués par la DINEPA ont bien entendu été déduits de l'estimation préliminaire (Illustration 15).

Commune	Latitude	Longitude	Heures de pompage par jour	Prélèvement (m ³ /h)	Prélèvement (m ³ /an)
Ouanaminthe	19.552	-71.716	12	47	205 860
	19.551	-71.715	12	57	249 660
	19.551	-71.715	12	48	210 240
Cap Haïtien	19.721	-72.192	9	180	591 300
	19.720	-72.185	9	144	473 040
	19.722	-72.183	9	126	413 910

Illustration 16 – Données de prélèvements AEP recueillies auprès de la DINEPA

Il est apparu très difficile de quantifier les prélèvements associés à l'irrigation. Aucune information n'ayant pu être collectée par DAI, ceux-ci ont été négligés, à l'exception de deux ouvrages répertoriés par le BRGM en 2010. L'erreur commise ne devrait cependant pas être préjudiciable au regard des faibles volumes concernés.

Pour l'usage industriel, l'enquête réalisée par les étudiants de Port-au-Prince n'a permis d'identifier que sept points de prélèvements, tous concernent la production d'eau de boisson en sachet. Encore une fois, les informations semblent peu accessibles.

Un total de 2109 points de prélèvements a été identifié sur les communes recoupées par le modèle pour un prélèvement annuel moyen estimé à 12.0 Mm³/an (Illustration 17). L'usage AEP correspond à un volume annuel de 11.8 Mm³/an. L'illustration 18 présente un récapitulatif des volumes associés à l'usage AEP, par commune et en distinguant zones rurales et urbaines.

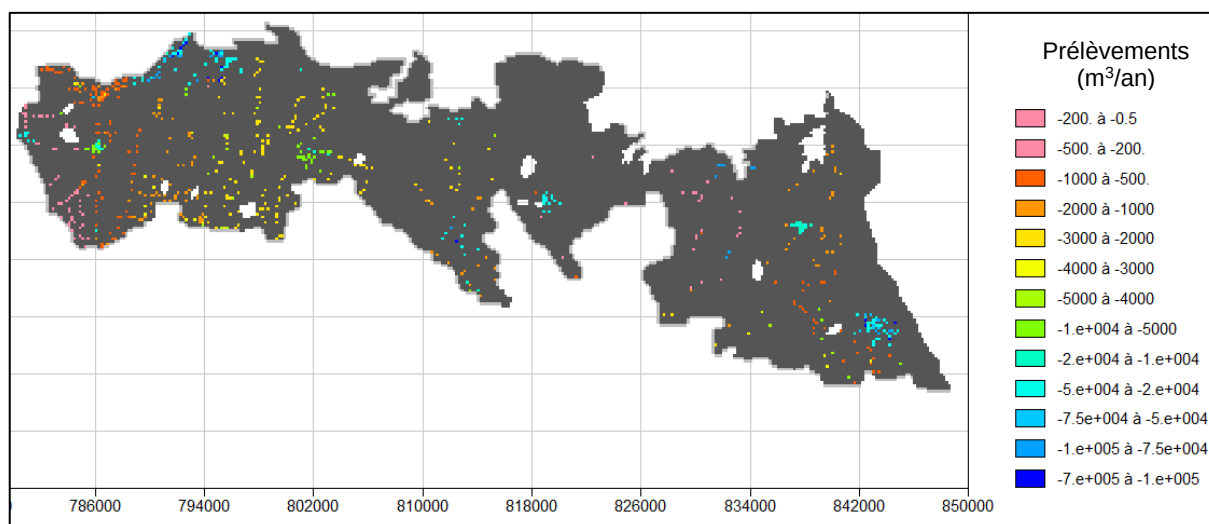


Illustration 17 – Répartition des prélèvements en nappe intégrés dans le modèle

Commune	AEP_rural (m ³ /an)	AEP_urbain (m ³ /an)	TOTAL (m ³ /an)
Acul du Nord	270 801	153 837	424 638
Cap Haïtien	55 275	5 213 676	5 268 951
Capotille	131 986	-	131 986
Caracol	32 412	708 476	740 888
Ferrier	41 392	229 234	270 626
Fort-Liberté	54 781	688 036	742 817
Limonade	243 920	232 938	476 858
Milot	144 910	123 202	268 111
Ouanaminthe	257 140	1 811 618	2 068 758
Plaine du Nord	183 680	170 034	353 714
Quartier Morin	138 396	54 727	193 124
TDN	163 443	678 149	841 592
Terrier Rouge	42 848	-	42 848
TOTAL (m³/an)	1 760 983	10 063 927	11 824 910

Illustration 18 – Prélèvements annuels moyens par commune pour l'alimentation en eau potable

4. Calage en régime permanent

Le calage en régime hydraulique permanent consiste à simuler une configuration particulière durant laquelle, sous l'effet de contraintes externes invariantes, le système aquifère atteint un régime d'équilibre que le modèle doit restituer au mieux (Barthelemy et al., 2015).

Le calage en régime permanent porte sur un état hydraulique stabilisé n'induisant ni stockage ni déstockage d'eau dans le système aquifère, donc sans contribution de la capacité d'emménagement du milieu souterrain. Cette phase de calage est par conséquent circonscrite à la seule distribution spatiale des perméabilités, et de la recharge (par zone) lorsque son estimation initiale est remise en cause dans le processus de calage.

4.1. DONNEES DE REFERENCE POUR LE CALAGE

Pour s'assurer que le modèle reproduit correctement le fonctionnement du système aquifère, il faut disposer de mesures de terrain permettant de comparer les résultats de simulation aux relevés effectués dans un réseau d'observation : mesures ponctuelles associées à un état stabilisé pour le calage en régime permanent, mesures répétées (chroniques) pour le calage en régime transitoire.

4.1.1. Niveaux piézométriques

L'ensemble des relevés piézométriques disponibles a été compilé, les trois principales sources d'information utilisées sont les mesures relevées par DAI dans le cadre du projet AVANSE, par le BRGM en 2010 ainsi que l'inventaire des points d'eau du PNUD (Tomasi, 1990).

Après analyse et nettoyage des données (élimination de valeurs aberrantes et anciennes pour l'essentiel), l'échantillon est constitué de 792 points d'observation distincts (Cf. répartition, Illustration 4 et Illustration 24). Les relevés sont asynchrones, mais permettent tout de même de guider le calage en régime permanent, en particulier dans les secteurs où le battement de la nappe alluviale est faible.

Il faut souligner que les points de mesure sont très peu nombreux dans le bassin versant de la rivière Marion et dans la moitié est de celui de Trou du Nord.

En complément des relevés ponctuels, le calage a pu s'appuyer sur la carte piézométrique établie par Tomasi (1990), et révisée dans le cadre du présent projet de modélisation (Illustration 4).

En l'absence de chroniques piézométriques, le BRGM avait préconisé la mise en place d'un suivi piézométrique régulier (fréquence hebdomadaire) sur une dizaine de points implantés dans des contextes différents : proche et éloigné des cours d'eau, aval / amont de la plaine. De tels suivis sont, en effet, primordiaux pour comprendre la dynamique d'une nappe : réaction aux précipitations, échanges nappe-rivière, etc. Ce suivi n'a finalement pas pu être mis en œuvre dans les délais du projet de modélisation.

4.1.2. Débits des cours d'eau

La carte de l'illustration 19 répertorie les différentes stations hydro-climatiques disponibles sur la zone d'étude : stations climatiques, stations hydrométriques historiques, pluviomètres installés par DAI et sections de rivières jaugées par DAI.

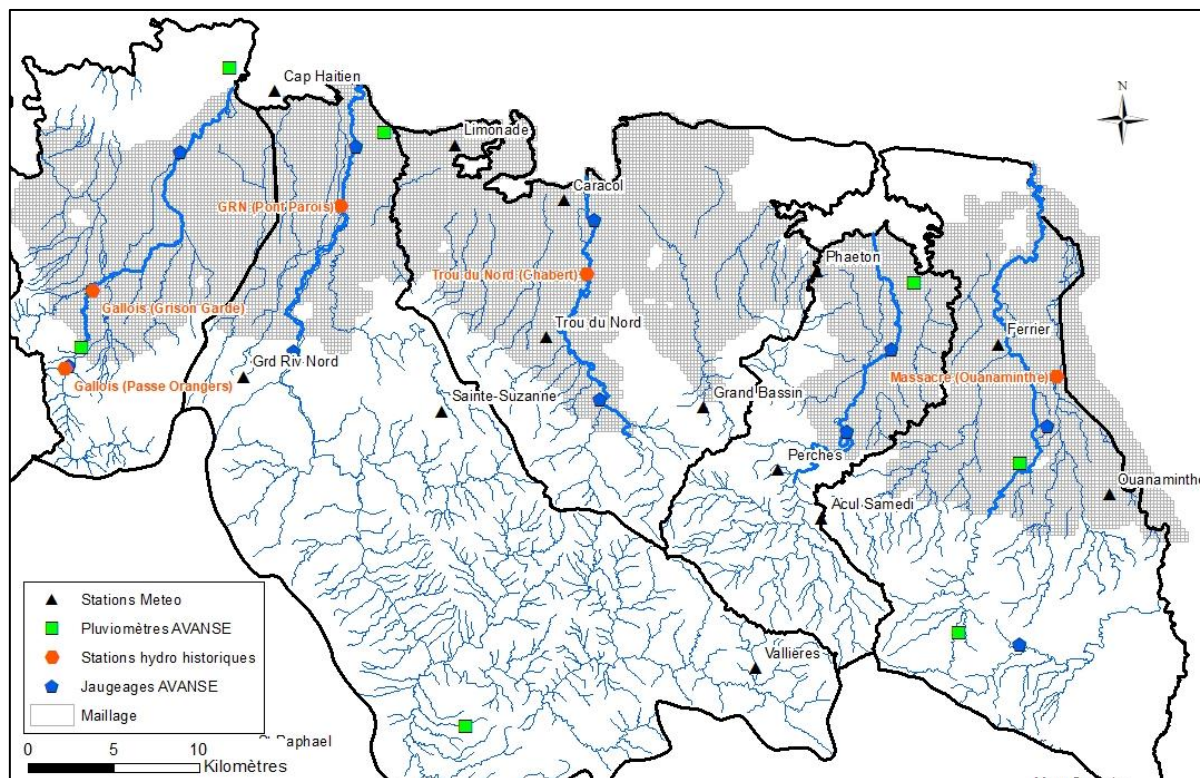


Illustration 19 – Carte de localisation des stations hydro-climatiques et des sections jaugées par DAI

Aucune chronique de débits n'a pu être retrouvée par DAI. Seuls des débits inter-annuels moyens sont indiqués dans les documents consultés, plus rarement des débits minimums et maximums journaliers (Cf. tableau récapitulatif, Illustration 20). Ces données correspondent à des suivis anciens, entre 1920 et 1940 pour la plupart.

Aucune information n'a été retrouvée dans la littérature pour les rivières Marion et Jassa.

Dans le cadre du projet AVANSE, des jaugeages au micromoulinet sont régulièrement effectués sur des sections amont et aval de chacune des cinq rivières principales (Cf. localisation, Illustration 19). Les mesures ont démarré en août 2016 et sont réalisées à la fréquence hebdomadaire.

Les données mises à disposition du projet de modélisation s'avèrent cependant très partielles, à savoir une valeur mensuelle par station de janvier à juillet 2017 (Illustration 21). Il faut souligner que dans de nombreux cas, les débits amont sont plus importants que les débits aval. Cela varie d'une station de mesure à l'autre et d'un mois à l'autre : systématique pour la rivière Marion, certains mois pour les autres.

Plusieurs explications sont possibles : incertitudes des mesures et représentativité des sections de jaugeage, prélèvements en rivière, infiltration vers la nappe, condition hydrologique différente entre 2 mesures (pluie).

Il aurait été intéressant de disposer des dates de mesure, mais cette information n'a pas été remontée.

En définitive, **le suivi des cours d'eau n'est pas suffisant pour permettre un calage du modèle du point de vue des écoulements superficiels**. Seuls des ordres de grandeur pourront être confrontés en régime permanent. Tout calage en régime transitoire est exclu.

Cours d'eau	Station hydrométrique	Qmoy (m³/s)	Période	Source
Grande Rivière du Nord	Pont Parois	8.3	1924-1940 1976-1979	LGL, 1977
		7.7 (0.02 à 390)	1922-1940	US Army, 1999
Gallois	Grison Garde	0.82	1922-1931	LGL, 1977
	Passe orangers	0.26	1929-1931	LGL, 1977
Trou du Nord	Chabert	0.83	1927-1929 1976-1978	LGL, 1977
		0.98	1923-1940	LGL, 1977
Massacre	Ouanaminthe	5.4 (0.05 à 450)	1922-1941	US Army, 1999 LGL, 1977

Illustration 20 – Tableau récapitulatif des données de débit compilées à partir de la littérature

		Débits en m3/s									
Cours d'eau	Section	janv-17	févr-17	mars-17	avr-17	mai-17	juin-17	juil-17	Qmoy	Qmin	Qmax
Haut du Cap	amont	1.7	1.92	0.59	1.27	0.59	0.31	0.15	0.93	0.15	1.92
	aval	0.64	0.36	0.89	1.34	0.15	0.14	0.88	0.63	0.14	1.34
GRN	amont	2.17	2.03	1.53	5.85	2.95	2.22	2.23	2.71	1.53	5.85
	aval	2.58	1.67	2.21	6.44	4.15	2.09	3.38	3.22	1.67	6.44
Trou du Nord	amont	0.22	0.36	0.53	0.54	0.17	0.17	0.22	0.32	0.17	0.54
	aval	0.43	0.26	0.43	0.81	0.29	0.39	0.44	0.44	0.26	0.81
Marion	amont	0.31	0.27	0.31	0.79	0.6	0.32	0.66	0.47	0.27	0.79
	aval	0.05	0.07	0.05	0.44	0.32	0.19	0.52	0.23	0.05	0.52
Jassa	amont	0.31	0.12	0.04	0.41	0.07	none	0.05	0.17	0.04	0.41
	aval	0.12	0.11	0.12	1.11	0.24	none	0.22	0.32	0.11	1.11

Illustration 21 – Résultats des jaugeages réalisés par AVANSE entre janvier et juillet 2017

4.1.3. Sources et zones humides

La comparaison entre une cartographie des zones humides et/ou inondables et l'étendue des zones de débordement du modèle peut aider à la validation du calage.

L'Illustration 22 présente la délimitation des zones humides et des zones fréquemment inondées ou propices aux inondations (source : CNIGS, Centre National de l'Information Géo-Spatiale). En complément, d'autres zones humides ont été identifiées à partir de Google Earth© (Cf. délimitation en bleu marine).

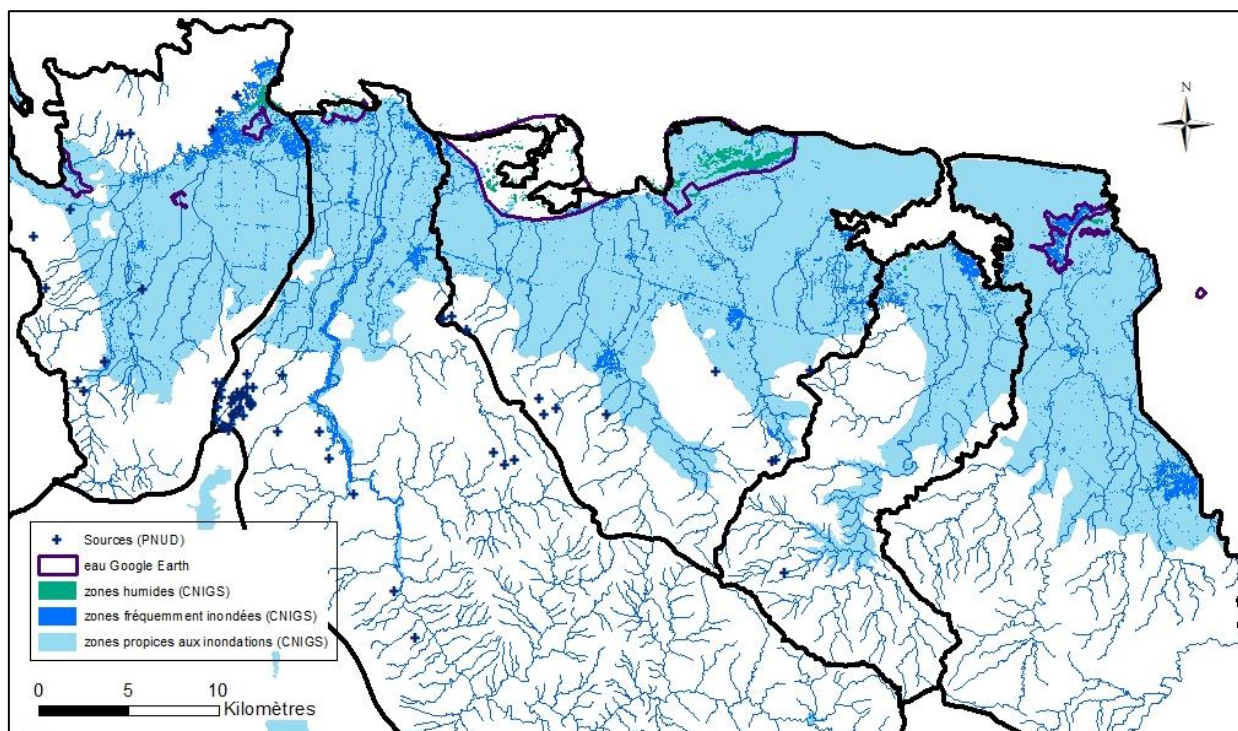


Illustration 22 – Carte des zones humides et des zones inondables (CNIGS)

4.1.4. Paramètres hydrodynamiques

Le BRGM s'est chargé de la compilation sous MS Excel© des données liées aux pompages d'essai reportés dans le rapport de Tomasi, 1990b (Arnaud, 2017).

Les valeurs de transmissivité interprétées, au nombre de dix (seulement sept localisables), sont comprises entre $5,0 \cdot 10^{-4}$ et $1,3 \cdot 10^{-2}$ m²/s, pour une valeur moyenne de $3,0 \cdot 10^{-3}$ m²/s. Les niveaux captés par les ouvrages concernés sont tous situés à des profondeurs supérieures à 25 m (supérieures à 40 m pour 8 forages sur 10).

Une relation linéaire semble se dessiner entre les valeurs de transmissivités et celles de débits spécifiques (Arnaud, 2017). À titre indicatif, de nouvelles valeurs de transmissivité ont été calculées sur la base de cette relation linéaire (Illustration 23).

Les pompages d'essai de courte durée conduits dans le cadre du projet AVANSE n'ont pu être utilisés, faute de validation des données et d'interprétation dans un délai compatible avec le projet de modélisation.

Forage	X_utm18N	Y_utm18N	Qs (m3/h/m)	T (m²/s)	K (m/s)
182/1b	821350	2173055	0.7	5.2E-04	8.7E-05
131/2	798020	2180180	1.5	6.2E-04	8.5E-05
115/1b	819500	2173050	2.2	8.8E-04	5.2E-05
124/1c	812700	2176300	3.1	8.0E-04	4.7E-05
180/1b	832300	2174020	4.7	2.5E-03	2.3E-04
125/1c	811500	2176700	6.8	2.8E-03	1.9E-04
122/2	797230	2182330	7.4	3.0E-03	3.1E-04
139/2	795750	2181064	7.9	3.1E-03	4.1E-04
161/2	798200	2179580	9.8	1.3E-02	1.0E-03
118/2	799820	2175820	10.6	4.2E-03	1.4E-04
177/1b	832600	2174070	20.9	8.4E-03	6.8E-04
121/2	797500	2182700	23.9	9.6E-03	6.9E-04
106/1c	801152	2178620	30.3	1.2E-02	1.1E-03
124/2	798700	2181450	38.2	1.5E-02	1.7E-03
Qs : débit spécifique T : transmissivité K : perméabilité			55.8	2.2E-02	2.0E-03
			MIN.	5.2E-04	4.7E-05
			MAX.	2.2E-02	2.0E-03
			MOY.	6.6E-03	5.8E-04

Illustration 23 – Tableau récapitulatif des valeurs de transmissivité et de perméabilité disponibles
(en rouge : transmissivités calculés à partir des débits spécifiques)

4.2. PRINCIPALES ETAPES SUIVIES LORS DU PROCESSUS DE CALAGE

Les trois principaux paramètres ajustés pour le calage ont été : la perméabilité, les charges hydrauliques sur les limites à potentiel imposé ainsi que la lame d'eau infiltrée sur la plaine dans une moindre mesure.

Au-delà de retranscrire au mieux les niveaux piézométriques, il est important de procéder à certains contrôles de cohérence sur différents éléments du bilan hydraulique :

- 1) les débits entrants par les limites à potentiel imposé. En effet, le logiciel de modélisation calcule pour chaque maille de la limite le débit échangé avec la zone amont non modélisée. Un contrôle de cohérence est donc indispensable pour s'assurer que le débit global entrant par la limite amont est compatible avec l'extension, les propriétés hydrogéologiques et la recharge potentielle du bassin versant amont (Cf. § 4.3.4) ;
- 2) les débits de débordement, en confrontant notamment les zones de débordement avec les zones humides et zones inondables connues d'une part (Illustration 22) et avec le réseau hydrographique secondaire d'autre part ;
- 3) le suivi de la convergence des calculs via différents indicateurs : débits résiduels d'erreur, déséquilibre du bilan hydraulique, écart de charge hydraulique entre itérations successives (pouvant révéler des oscillations numériques), etc.

Avec un coefficient de non convergence interne de 7.10^{-7} % (somme des valeurs absolues des débits résiduels d'erreur de chaque maille sur le flux maximum transitant dans le modèle), la convergence est jugée très satisfaisante. À titre indicatif, le temps de calcul du modèle en régime permanent est de quelques secondes.

4.2.1. Ajustement des perméabilités

Concernant le champ de perméabilité, une analyse de sensibilité a tout d'abord été menée en testant différentes valeurs de perméabilité, à chaque fois uniforme sur tout le domaine modélisé. De façon préliminaire, la valeur moyenne de 1.10^{-5} m/s a été retenue, valeur offrant un bon compromis entre la restitution de la piézométrie et la cohérence des débits entrants par les limites amont.

Pour la suite du calage en régime permanent, l'ajustement des perméabilités s'est avant tout appuyé sur les zones de forte résistivité électrique mises en évidence par les investigations géophysiques de 1980. Ces zones identifiées comme plus résistantes correspondent, en effet, à des alluvions plus grossières et donc plus perméables. Cela avait été ponctuellement confirmé par des forages de reconnaissance.

Ces zones à plus forte perméabilité ont, par conséquent, été le point de départ de l'ajustement des perméabilités, mais nous nous sommes bien entendu autorisés à sortir de ce cadre lorsqu'il ne permettait pas d'améliorer le calage (Cf. champ de perméabilité, Illustration 28).

Par ailleurs, nous nous sommes attachés à privilégier des plages de valeur uniforme plutôt que des mosaïques contrastées de valeurs cherchant à reproduire précisément les données de terrain (mesures piézométriques et/ou perméabilités déduites des pompages d'essai ponctuels) mais ne pouvant reposer sur des arguments hydrogéologiques.

Enfin, une attention particulière a été portée aux onze zones d'intérêt du projet AVANSE (Illustration 24), pour lesquelles une exploitation du modèle est attendue. Une forte densité de relevés piézométriques est, de plus, disponible au droit de ces zones.

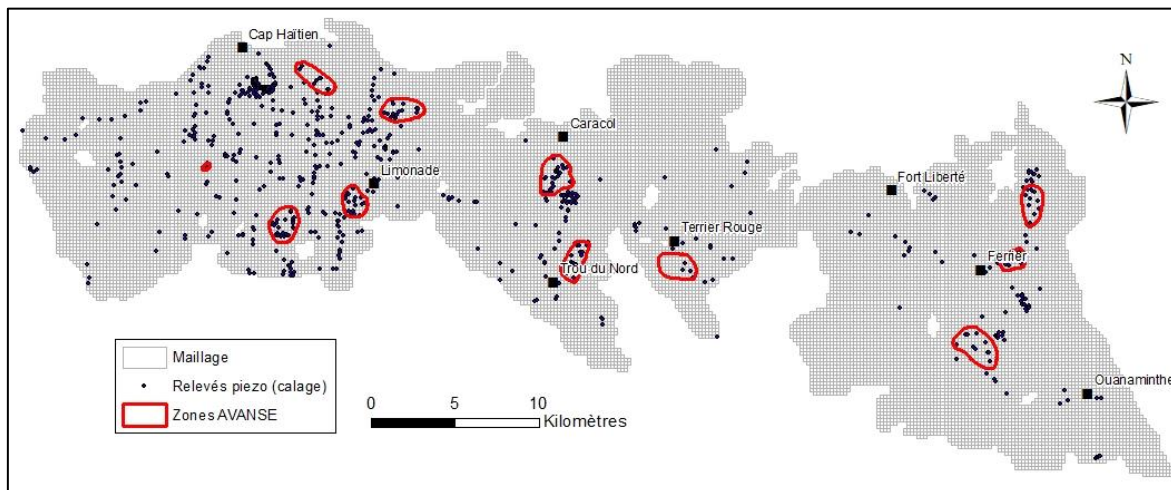


Illustration 24 – Carte de localisation des zones d'intérêt du projet AVANSE

4.2.2. Ajustement des charges imposées en amont

En première approche, pour permettre une affectation initiale des valeurs, les charges imposées ont été évaluées à partir de la relation linéaire mise en évidence entre l'altitude topographique et le niveau piézométrique (Illustration 25). Un ajustement important a toutefois été nécessaire dans la suite du calage afin de respecter d'une part la cohérence des débits entrants dans la plaine alluviale et, d'autre part les niveaux piézométriques observés sur l'amont de la plaine.

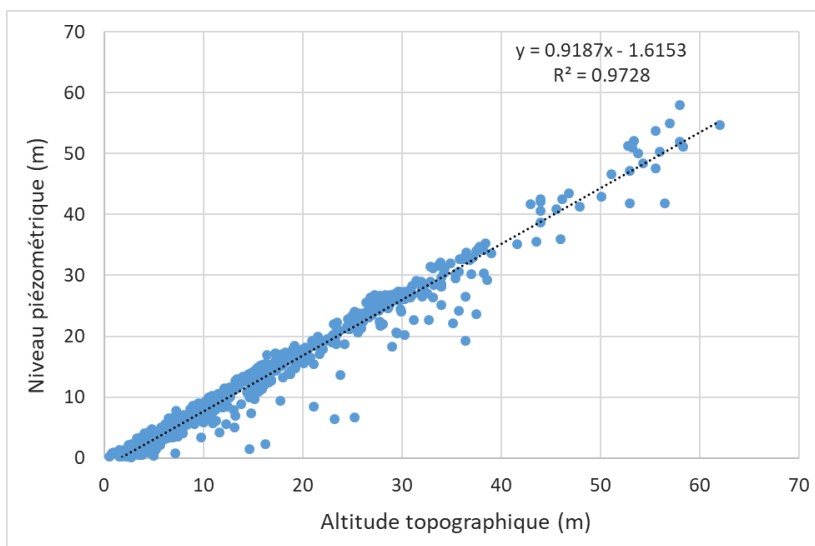


Illustration 25 – Relation linéaire entre altitude topographique et niveau piézométrique

Pour le calcul des pluies efficaces drainées en amont du domaine modélisé, différentes zones de drainage sont distinguées pour chaque bassin versant. L'Illustration 26 propose un exemple de découpage pour le bassin de la Grande Rivière du Nord.

Dans cet exemple, les zones identifiées A et B participent à l'alimentation des alluvions par infiltration des précipitations efficaces au débouché dans la plaine tandis que les zones C et D sont utilisées pour calculer le débit moyen introduit dans la première maille rivière (Cf. 3.5).

Les zones A, B et C sont rattachées aux précipitations de la station climatique de Grande Rivière du Nord alors que la zone D, plus en amont, est associée à la station de Vallières (Illustration 26).

À titre indicatif, le tableau de l'Illustration 27 présente les précipitations efficaces ainsi calculées (selon la méthode du bilan hydrologique de Thornthwaite).

Pour les mailles amont des cinq rivières modélisées, la valeur a directement été introduite dans le modèle comme correspondant au débit annuel moyen de la rivière dans la première maille (extrémité amont de la plaine). Pour les limites à charge imposée, il a été vérifié que les débits entrants simulés par le modèle restaient cohérents avec les ordres de grandeur des pluies efficaces estimées (Cf. bilans hydrauliques, § 4.3.5).

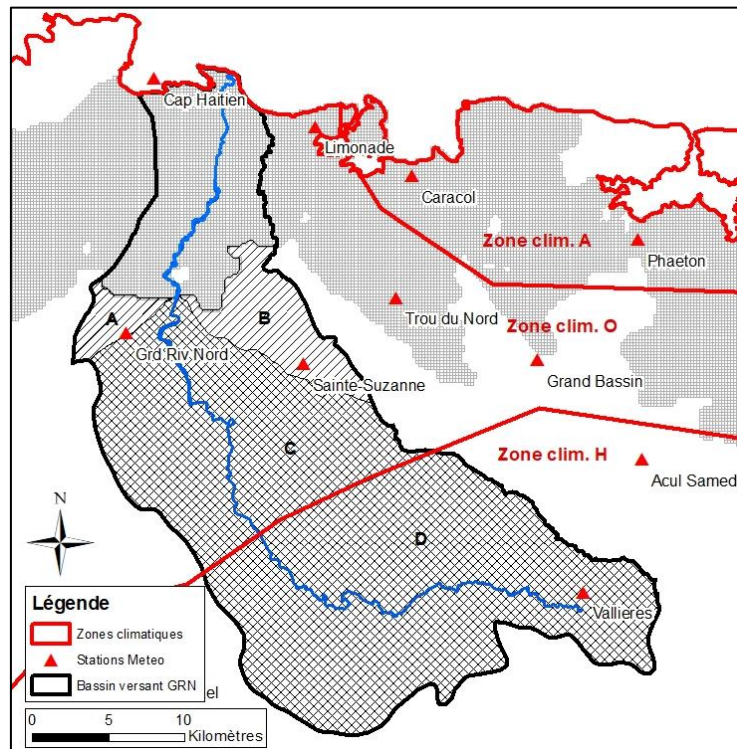


Illustration 26 – Délimitation des zones de drainage amont pour le calcul des précipitations efficaces

Bassin versant	Débits amont rivière (m ³ /s)	Débits limites à charges imposées (Mm ³ /an)
Haut du Cap	0.24	24.2 + 6.6*
Grande Rivière du Nord	8.7	24.2
Trou du Nord	0.27	15.9
Marion	1.8	6.2
Jassa	1.0	85.6

*Débit entrant par la limite correspondant à la montagne de Cap Haïtien

Illustration 27 – Précipitations efficaces annuelles calculées en amont du domaine modélisé

4.2.3. Ajustement de la recharge

En régime permanent, les niveaux piézométriques se sont avérés relativement peu sensibles à la variabilité de la recharge. Seule la valeur affectée à la zone de recharge n° 3 (cf. Illustration 12) a été modifiée avec une lame d'eau infiltrée annuelle abaissée de 200 à 180 mm.

4.3. RESULTATS OBTENUS

4.3.1. Champ de perméabilité

L'Illustration 28 présente la distribution spatiale des perméabilités des alluvions obtenue à l'issue du calage en régime permanent.

Les perméabilités varient entre 1.10^{-5} et $1.5.10^{-4}$ m/s. Sur la base des épaisseurs saturées en eau de l'aquifère alluvial, les transmissivités correspondantes varient entre $1.7.10^{-4}$ et 3.10^{-2} m²/s. Il est rappelé que la transmissivité est le produit de la perméabilité par l'épaisseur saturée.

Ces valeurs sont conformes aux gammes de valeurs communément admises pour des alluvions et aux données de terrain. Pour rappel, les transmissivités calculées à partir des pompages d'essai conduits sur la Plaine du Nord varient, en effet, entre $5.2.10^{-4}$ et $2.2.10^{-2}$ m²/s.

Comme évoqué précédemment, les plus fortes perméabilités sont rencontrées pour l'essentiel au droit des zones où les investigations géophysiques avaient mis en évidence des alluvions plus grossières (zones de plus forte résistivité d'un point de vue géo-électrique). Ces investigations n'avaient quasiment pas concernées le bassin versant de la Jassa, c'est pourquoi aucune zone de forte résistivité n'y est mentionnée sur la carte de l'Illustration 28.

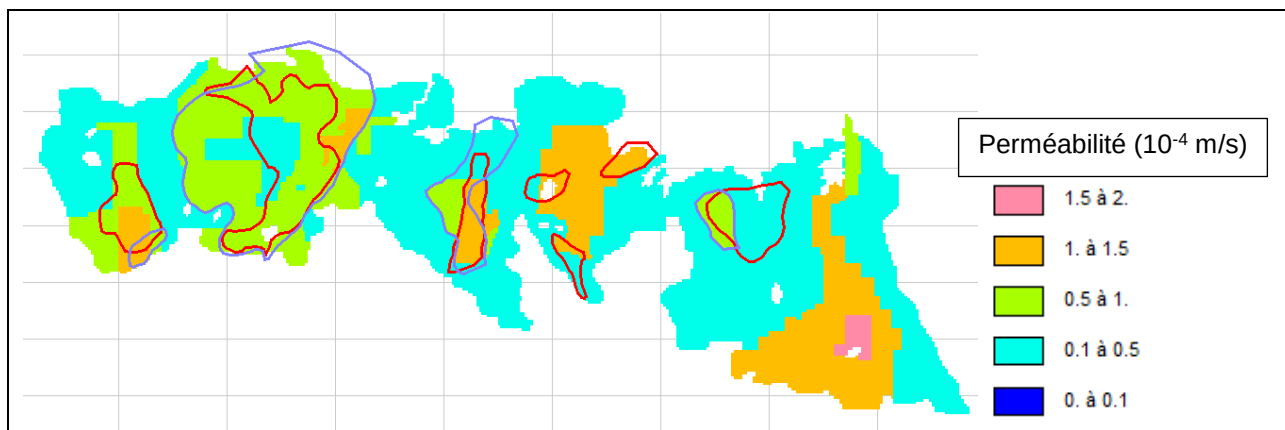


Illustration 28 – Champ de perméabilité des alluvions à l'issue du calage en régime permanent (polygones bleu : zones résistantes superficielles, polygones rouge : zones résistantes profondes)

4.3.2. Piézométrie

L'Illustration 29 présente deux diagrammes de dispersion, un premier considérant l'ensemble des 792 points de mesure et un second reprenant uniquement les points de mesure du projet AVANSE et du BRGM (2010), données plus récentes et correspondant à des secteurs où une attention particulière a été portée pendant le calage (506 points de mesure).

Un diagramme de dispersion consiste à reporter les valeurs simulées en fonction des valeurs observées. Un tel diagramme permet de suivre la progression du calage, simulation après simulation, et de repérer très rapidement les biais.

Le tableau de l'Illustration 30 propose un comparatif synthétique des charges hydrauliques simulées et observées pour les mesures AVANSE et BRGM.

En conclusion, la restitution des niveaux piézométriques du modèle apparaît très satisfaisante, en particulier dans les zones d'intérêt du projet AVANSE. Il faut notamment noter une valeur moyenne des écarts très faible (- 6 cm), caractéristique de l'absence d'une sous-estimation ou d'une surestimation systématique du modèle. Cela est également bien visible sur les diagrammes de dispersion où les points sont distribués de façon homogène sur et autour de la droite d'équation $y=x$.

Par ailleurs, il est rappelé que les données observées sont asynchrones, une erreur proportionnelle au battement de la nappe peut donc être attendue.

En complément, il est intéressant de comparer la carte piézométrique simulée et la carte piézométrique disponible (Tomasi, 1990) (Illustration 31). Il ne faut pas considérer cette dernière comme une référence absolue, en particulier dans les secteurs où elle apparaît peu contrainte par des relevés de terrain.

Ceci étant dit, les deux cartes montrent une très bonne correspondance pour les bassins versants du Haut-du-Cap, de Grande Rivière du Nord et de Trou du Nord. Les courbes isopèzes comprises entre 2 m et 20 m y sont quasiment superposées.

Vers l'est, la correspondance est un peu moins bonne à partir de Terrier Rouge et pour les bassins versants des rivières Marion et Jassa.

Il faut cependant prendre en compte dans ces secteurs la faible densité des mesures de terrain, et donc une carte piézométrique établie en 1990 plus incertaine. Seules des mesures piézométriques supplémentaires permettraient de valider ou améliorer le calage du modèle dans cette zone.

Quoi qu'il en soit, les directions d'écoulement de la nappe et les gradients hydrauliques apparaissent bien reproduits par le modèle.

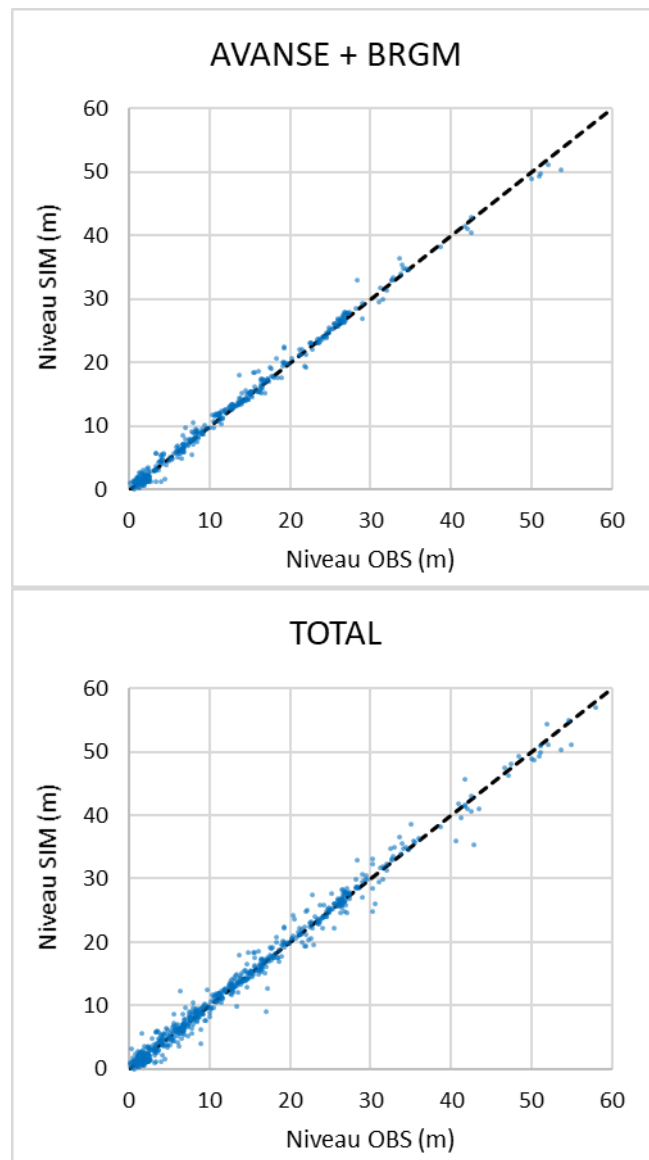


Illustration 29 – Diagrammes de dispersion pour la totalité des points d'observation (en haut) et pour les points AVANSE et BRGM (en bas). La droite en pointillé représente la droite d'équation $y = x$

Moyenne des valeurs observées (m)	9.9
Moyenne des valeurs simulées (m)	9.9
Ecart-type des valeurs observées (m)	8.7
Ecart-type des valeurs simulées (m)	10.5
Moyenne des écarts (m)	-0.06
Ecart-type des écarts (m)	0.86
Equation de la droite de régression	$H_{sim} = 1.01 \times H_{obs} - 0.16$ $R^2 = 0.99$

Illustration 30 – Tableau comparatif entre charges hydrauliques simulées et observées

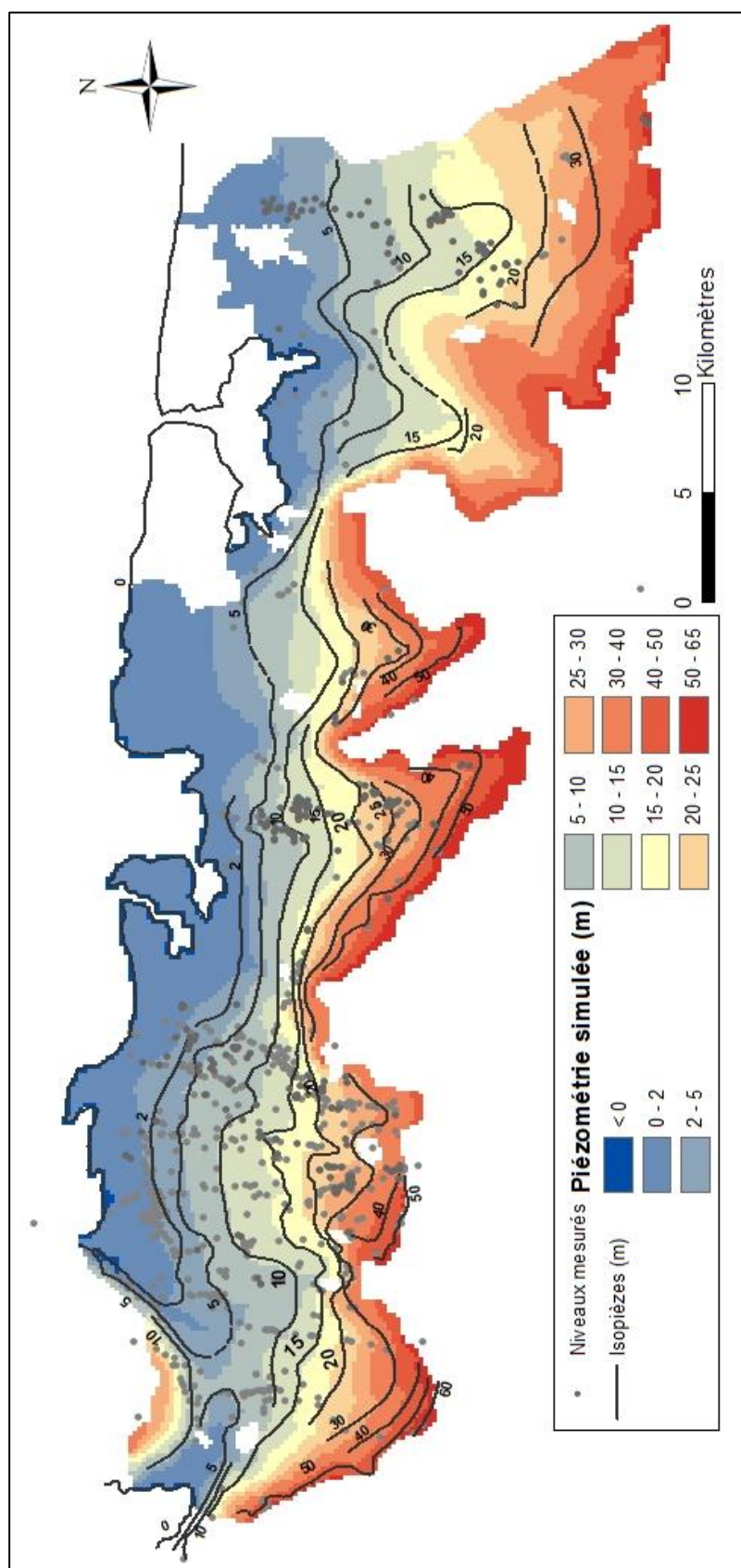


Illustration 31 – Piézométrie de la nappe alluviale du Nord simulée en régime permanent

4.3.3. Débits des principaux cours d'eau

Le calage des débits d'une rivière en régime permanent n'a pas réellement de sens physique, aussi, nous nous limiterons ici à comparer les débits simulés aux données observées disponibles. Comme indiqué par les tableaux suivants (Illustration 32), les ordres de grandeur sont cohérents. Seule une phase de calage en régime transitoire permettrait d'aller plus loin sur la question des écoulements superficiels.

Le premier tableau présente les Modules⁶ calculés à partir des mesures enregistrées entre 1920 et 1940 pour la Grande Rivière du Nord à Pont Parois, pour la rivière Haut du Cap à Passe Oranger (extrémité amont de la plaine) et à Grison Garde ainsi que pour la rivière Trou du Nord à Chabert (Cf. localisation, Illustration 19).

Le second tableau dresse un comparatif entre simulations et observations au droit des sections de jaugeage du projet AVANSE se situant à l'intérieur du modèle (Cf. localisation, Illustration 19). Pour ces points, il est rappelé que seuls 5 jaugeages mensuels sont disponibles (dates non communiquées) ; la comparaison entre un débit simulé en régime permanent et ces débits ponctuels est donc proposé uniquement à titre indicatif.

Il est cependant intéressant de souligner que les débits simulés restent dans des gammes de valeurs acceptables, en particulier pour les rivières Haut du Cap et Trou du Nord. Pour le reste, les débits simulés apparaissent un peu supérieurs aux observations relevées ponctuellement. Ces différences restent cependant faibles au regard des incertitudes liées aux opérations de jaugeage d'une part et au modèle d'autre part (paramètres descriptifs du réseau hydrographique + débits introduits dans la maille amont des 5 rivières). À ce stade des connaissances, il n'est pas possible d'approfondir l'analyse.

STATIONS HISTORIQUES (1920-1940)				
	Débit_Rivi X148_Y72 GRN_Parois	Débit_Rivi X72_Y120 HDC_Oranger	Débit_Rivi X72_Y108 HDC_Grison	Débit_Rivi X221_Y86 TDN_Chabert
Débits moyens annuels observés (m3/s)	8.18	0.26	0.82	0.98
MODELE (m3/s)	9.24	0.25	0.36	0.57

Source : Tomasi, 1990 (étude du PNUD)

JAUGEAGES DAI (JANVIER à JUILLET 2017)							
	Débit_Rivi X101_Y62 HDC_aval	Débit_Rivi X152_Y60 GRN_aval	Débit_Rivi X221_Y82 TDN_aval	Débit_Rivi X308_Y119 Marion_aval	Débit_Rivi X351_Y142 Jassa_aval	Débit_Rivi X223_Y134 TDN_amont	Débit_Rivi X295_Y143 Marion_amont
MOYENNE	0.64	4.21	0.41	0.44	0.31	0.32	0.53
MINIMUM	0.14	1.67	0.19	0.07	0.12	0.17	0.21
MAXIMUM	2.39	9.88	0.81	1.7	1.11	0.54	1.16
MODELE (m3/s)	1.53	9.20	0.57	2.13	1.49	0.31	1.91

Illustration 32 – Débits des rivières simulés vs débits mesurés sur le terrain

⁶ Débits moyens inter-annuels

4.3.4. Zones de débordement

La carte de l'illustration 33 montre que la concordance entre les zones de débordement simulées par le modèle en régime permanent et les zones humides est relativement bonne. Les principales zones marécageuses en aval de la plaine sont, en effet, bien reproduites par le modèle.

Ailleurs, les débordements de nappe simulés correspondent majoritairement à l'alimentation du réseau hydrographique secondaire. Il faut noter que le réseau hydrographique numérique reporté sur l'illustration 33 n'est pas toujours complet et/ou correct.

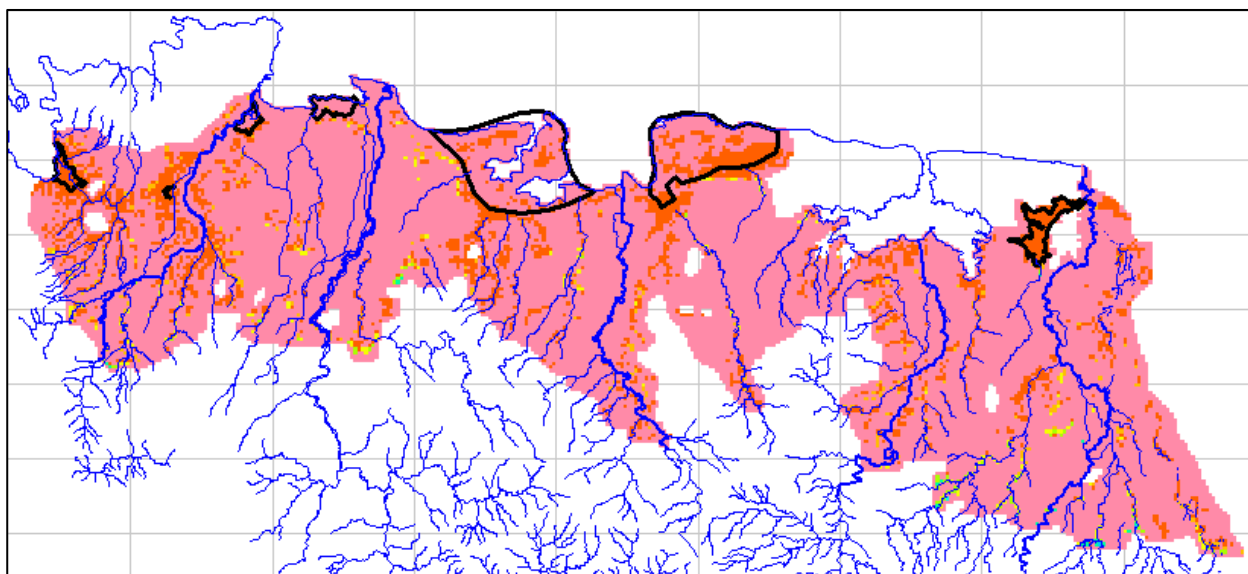


Illustration 33 – Confrontation des zones de débordement simulées et des zones humides et inondables

4.3.5. Bilan hydraulique

À l'échelle du domaine modélisé

Le schéma de l'illustration 34 représente de façon quantitative les principales composantes du bilan hydrologique de la nappe alluviale à l'échelle du modèle.

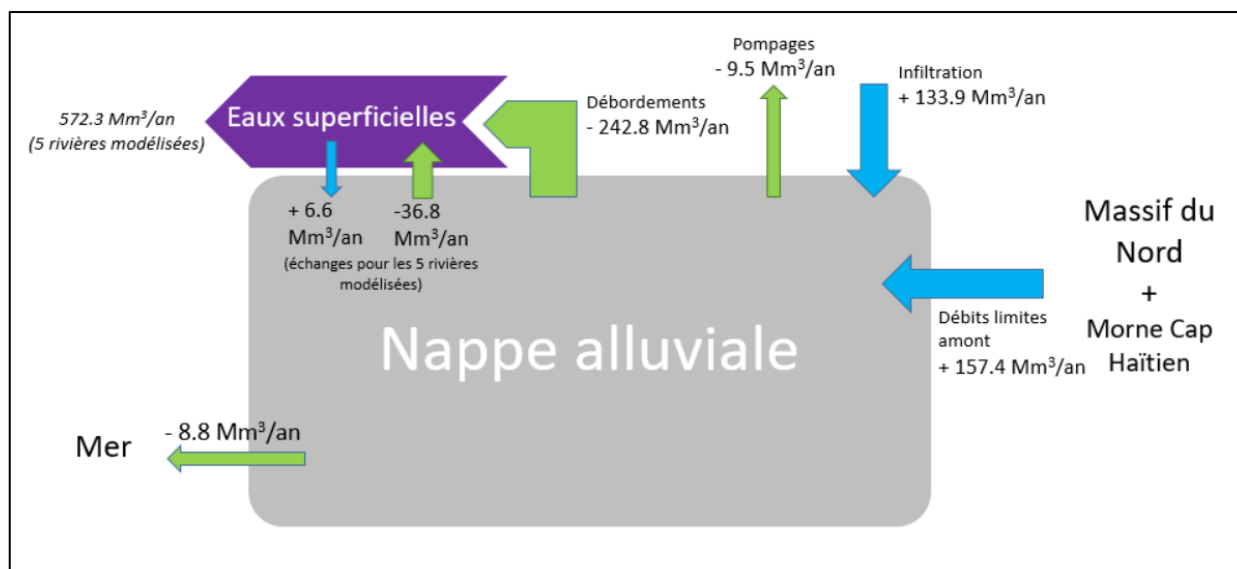


Illustration 34 – Principales composantes du bilan hydraulique de la nappe alluviale modélisée (en bleu les flux entrants, en vert les flux sortants)

Le premier enseignement du bilan hydrologique modélisé est que la part des prélèvements reste globalement modérée par rapport aux flux contribuant à l'alimentation de la nappe (infiltration + apports du Massif du Nord). **À l'échelle de la plaine, il peut donc être conclu à une disponibilité encore significative de la ressource en eau souterraine.** Comme nous le verrons ultérieurement, ce résultat global à l'échelle de la plaine **n'exclut pas localement des difficultés d'exploitation.** En effet, la question des volumes mobilisables est indissociable de considérations spatiales (localisation des prélèvements) et temporelles (hautes eaux / basses eaux).

En grande majorité, les 5 rivières modélisées drainent les eaux souterraines (alimentation des rivières par la nappe). Les débits d'échange de la nappe vers les cours d'eau représentent 85 % des flux échangés.

Il est difficile de comparer le bilan hydraulique obtenu à celui proposé par Tomasi en 1990 (§ 2), en raison notamment de domaines d'étude différents (1140 km² en 1990 contre 817 km² pour le modèle). En outre, certaines hypothèses ne sont pas communes aux deux approches : débordement de nappe non comptabilisé par Tomasi, reprise à la nappe par évaporation négligée dans le modèle. Compte tenu des différences de superficies, les différences observées sur les flux relatifs à la recharge météorique, aux échanges nappe-rivière ou encore à l'écoulement total apparaissent cohérentes avec des flux plus faibles dans le cas du modèle.

Les bilans ne sont pas directement comparables, il serait en tout cas erroné de conclure à une diminution des flux écoulés entre 1990 et 2016.

À l'échelle des bassins versants

Le tableau de l'illustration 35 récapitule les différents flux modélisés en régime permanent pour chacun des 5 bassins versants étudiés.

Comparativement aux flux contribuant au renouvellement de la nappe, **le poids des prélèvements le plus important concerne le bassin versant de Haut du Cap (6 %)**. Ce constat est en lien avec les pompages importants de la commune de Cap Haïtien. Pour les autres bassins versants, la part des prélèvements varient entre 1.3 % (Trou du Nord) et 3.1 % (Grande Rivière du Nord).

Comme discuté précédemment, les flux entrant par les limites amont du modèle sont comparables aux précipitations efficaces calculées sur les superficies drainées en amont (Cf. Illustration 27).

Sur le bassin versant de la Jassa, l'important volume de débordement simulé correspond avant tout à la contribution de la nappe au débit d'écoulement de la rivière Massacre. Il est, en effet, rappelé que cette dernière n'a pas été modélisée de façon explicite (réseau hydrographique secondaire modélisé par des mailles à débordement).

Enfin, il est intéressant de souligner que **le bassin versant de la rivière Marion présente le plus faible renouvellement de la nappe alluviale**, aussi bien du point de vue de la recharge que de celui des apports par le massif du Nord.

FLUX en Mm3/an						
BV	Recharge	Limites amont	Débordement	Nappe-rivière	Prélèvements	Sortie en mer
HDC	+36.7	+27.6	-52.1	-8.8	-4.0	-0.5
GRN	+20.7	+21.9	-31.2	-4.5	-1.3	-2.6
TDN	+35.4	+15.2	-43.5	-3.1	-1.3	-4.9
MARION	+12.1	+7.3	-15.0	-3.5	-0.5	-0.6
JASSA	+29.0	+85.4	-101.0	10.3	-2.4	-0.2

Illustration 35 – Bilan hydraulique de la nappe alluviale par bassin versant

4.4. PRINCIPALES INCERTITUDES ET PERSPECTIVES D'AMELIORATION

Il est important de garder à l'esprit que tout projet de modélisation hydrodynamique est entaché d'incertitudes. Ces dernières peuvent être associées d'une part aux limites intrinsèques de l'outil de modélisation et d'autre part aux limites introduites par méconnaissance du fonctionnement hydrogéologique de l'hydrosystème étudié.

Dans le cas présent du modèle maillé de la Plaine du Nord, les incertitudes sont avant tout liées à un défaut de disponibilité de certaines données hydro-climatiques. Les principales limites à considérer sont les suivantes :

- En l'absence de chroniques piézométriques et pluviométriques, le calage du modèle de nappe n'a pu être conduit qu'en régime hydraulique permanent. Il ne s'agit que d'une première étape de travail qui **devra être complétée par un calage en régime transitoire** permettant notamment de prendre en compte les capacités de stockage / déstockage de

l'aquifère. Dans son état actuel, le modèle ne répond pas aux exigences d'un modèle de gestion de la ressource en eau souterraine.

- Concernant la piézométrie de la nappe alluviale, **peu d'observations de terrain sont disponibles sur l'extrémité amont de la plaine** ainsi que sur le **bassin versant de la rivière Marion et sur la moitié est du bassin de Trou du Nord**. L'acquisition de données de référence supplémentaires dans ces secteurs permettrait de consolider le calage de la piézométrie en régime permanent.
- **La méconnaissance des paramètres descriptifs du réseau hydrographique modélisé** induit des incertitudes dans le calcul des échanges nappe-rivière, en particulier les cotes du fil d'eau et du fond du lit des rivières. Une campagne de levés topographiques (profils en travers) a été lancée fin 2017 par le projet AVANSE, les données en cours d'acquisition pourront utilement être intégrées dans le modèle.
- Dans le même ordre d'idée, **les écoulements superficiels ne peuvent être considérés comme calés** en l'absence d'un travail en régime transitoire. Aussi, les flux d'échange modélisés entre les 5 cours d'eau principaux et la nappe alluviale sont à considérer avec précaution ;
- Les **apports par le domaine extérieur**, principalement par les eaux ruisselées sur le massif du Nord dans notre cas, sont toujours **difficilement quantifiables** sur le terrain. Cependant, afin de valider les calculs du modèle vis-à-vis des flux entrants par l'amont, l'acquisition continue de données hydro-climatiques est préconisée, avec *a minima* le suivi 1) des débits des principaux cours d'eau à leur débouché dans la plaine, 2) des fluctuations piézométriques sur l'amont de la plaine alluviale et 3) des précipitations sur le massif.
- La **connaissance des prélèvements**, en nappe comme en rivière, reste incomplète. Certains ouvrages récents ont possiblement échappé à l'inventaire réalisé (parc industriel de Caracol, grandes exploitations agricoles, etc.). En particulier, des rabattements importants (de l'ordre de 30 m) aux forages du parc industriel de Caracol ont été signalés lors de la réunion de restitution des résultats du modèle. Des travaux d'enquête complémentaires seraient à envisager, les nouvelles données acquises pourront aisément être introduites dans le modèle.

Une première version du modèle hydrodynamique de la Plaine du Nord d'Haïti a été élaborée en s'appuyant sur l'ensemble des données et connaissances disponibles et acquises par le projet AVANSE. Le modèle doit désormais s'inscrire dans la durée afin de connaître des évolutions qui lui permettront de réduire les incertitudes décrites précédemment et d'élargir ainsi son champ d'applications.

À ce stade, la consolidation du modèle passe impérativement par une pérennisation de la surveillance des ressources en eau et du climat. Il est recommandé :

- de mettre en place des **stations hydrométriques** sur les principaux cours d'eau de la plaine, sur des sections amont et aval. À défaut, les campagnes de jaugeage hebdomadaires réalisées par DAI devront être poursuivies ;
- de mettre en œuvre un **réseau de surveillance piézométrique** permettant l'enregistrement en continu des fluctuations de la nappe dans différents contextes (amont / aval, à différentes distance des cours d'eau). Un tel suivi apporte des éléments de compréhension précieux quant à la dynamique saisonnière de la nappe, aux échanges

nappe-rivière et aux apports par l'amont. En bordure littorale, il est préconisé de compléter cette surveillance par un suivi de la conductivité électrique de l'eau. Un tel dispositif est, en effet, essentiel pour **comprendre les mécanismes d'une éventuelle salinisation des eaux souterraines**, en lien avec les prélèvements, la recharge et les écoulements (niveau marin, gradient hydraulique, cours d'eau, etc.) ;

- de maintenir le **réseau de pluviomètres** installés dans le cadre du projet AVANSE, à la fois au droit de la plaine alluviale et sur les reliefs du massif du Nord. Dans la mesure du possible, des mesures de l'ETP pourraient être envisagées : une au niveau de la plaine et une seconde sur les hauteurs.

5. Exploitation du modèle

Comme discuté précédemment, il n'est pas envisageable en l'état actuel des données hydro-climatiques disponibles de procéder au calage du modèle hydrodynamique de la Plaine du Nord en régime transitoire.

Toutefois, il était important pour le projet AVANSE d'appréhender les fluctuations saisonnières de la nappe alluviale. Aussi, le BRGM a proposé la construction de deux modèles théoriques en régime transitoire. Pour chacun, les hypothèses retenues et les principaux résultats sont détaillés ci-après (§ 5.1 et 5.2). En l'absence de calage en régime transitoire, ces derniers doivent être considérés avec prudence.

En complément, le BRGM a appuyé les étudiants de l'Université de Port-au-Prince dans la mise en œuvre de scénarios d'exploitation du modèle, scénarios dimensionnés par le projet AVANSE. Les résultats associés à un scénario de mise en service de pompes pour l'irrigation des parcelles AVANSE sont discutés dans le présent chapitre (§ 5.3).

5.1. REGIME TRANSITOIRE « MOYEN »

5.1.1. Description du modèle

Il s'agit d'un modèle théorique en régime transitoire dont le **pas de temps de calcul est mensuel pour une durée de 4 ans** (soit 48 pas de temps).

La piézométrie ainsi que les débits d'écoulement dans les cinq rivières, calculés à l'issue du calage en régime permanent, servent de conditions initiales pour le régime transitoire.

Dans ce scénario théorique moyen, **la variabilité mensuelle moyenne des conditions de recharge et des flux entrant par les limites du modèle est considérée**. En revanche, chacune des 4 années simulées est identique.

Les valeurs annuelles de la recharge et des débits d'eau entrant par les limites sont issues de la simulation en régime permanent et réparties mensuellement selon les hypothèses suivantes :

- recharge et débits entrant par la limite associée à la montagne calcaire de Cap Haïtien : selon la répartition mensuelle moyenne des précipitations efficaces calculées au pas de temps mensuel sur la période 2000-2016 pour la station de Cap Haïtien (source : MARNDR / USAI, Cf. Illustration 36) ;
- débits entrant par la limite amont et par les mailles rivières amont : selon la répartition mensuelle moyenne des précipitations efficaces calculées à partir de valeurs moyennes mensuelles anciennes de pluie et d'ETP pour des stations climatiques représentatives de l'amont (Grande Rivière du Nord, Mont Organisé et Vallières, Cf. Illustration 36).

Pour les simulations en régime hydraulique transitoire, on remplace donc les potentiels imposés sur les limites amont par des flux imposés.

Cette démarche permet de garantir que les débits entrants simulés par le logiciel de modélisation n'augmentent pas de façon irréaliste au cas où une importante baisse des charges affecterait la zone modélisée (sous l'effet de pompages à proximité des limites par exemple).

Pour le reste, les conditions aux limites restent inchangées (à charges imposées sur le littoral, limites latérales à flux nul, mailles à débordement sur tout le domaine).

Enfin, les prélèvements en nappe sont considérés constants tout au long de l'année.

Répartition mensuelle (%)		
Mois	Recharge + Limite montagne Cap Haïtien	Limite amont
janvier	17	5
février	8	5
mars	7	2
avril	4	2
mai	5	20
juin	0	15
juillet	0	5
août	0	6
septembre	6	10
octobre	11	10
novembre	27	10
décembre	14	10

Illustration 36 – Répartitions mensuelles de la recharge et des débits d'eau entrant par les limites amont pour le modèle transitoire « moyen »

5.1.2. Résultats

Suite à une première analyse de sensibilité, un coefficient d'emmagasinement uniforme de 2 % a été retenu sur l'ensemble du domaine modélisé. Ce paramètre, qui caractérise la fonction capacitive d'un aquifère, resterait à ajuster lors d'une phase future de calage en régime transitoire.

Bilan hydraulique de la nappe

Dans la configuration moyenne telle que simulée, l'alimentation de la nappe est maximale (> 30 Mm³/mois) durant le mois de mai et d'octobre à décembre (Illustration 37). Pour le mois de mai, l'alimentation est avant tout expliquée par les apports en provenance du massif du Nord.

Les plus faibles alimentations (< 10 Mm³/mois) sont simulées durant les mois d'avril, juillet et août (Illustration 37). Selon la répartition mensuelle retenue pour la recharge météorique, il est rappelé que l'infiltration est nulle de juin à août.

La part du débordement de la nappe dans les flux d'eau sortant de l'aquifère alluvial est largement prépondérante (Illustration 37) ; il est rappelé que ce débordement correspond à l'alimentation des zones marécageuses ainsi qu'à l'écoulement du réseau hydrographique secondaire, non

modélisé. À l'échelle du modèle, les flux de débordement varient entre 10 Mm³/mois en avril, juillet et août et quasiment 40 Mm³/mois au mois de novembre.

L'analyse du bilan hydraulique « moyen » montre que la nappe alluviale est en situation de stockage durant le mois de mai et de septembre à novembre (Illustration 38). À l'inverse, l'aquifère est en situation de déstockage de décembre à avril et de juin à août.

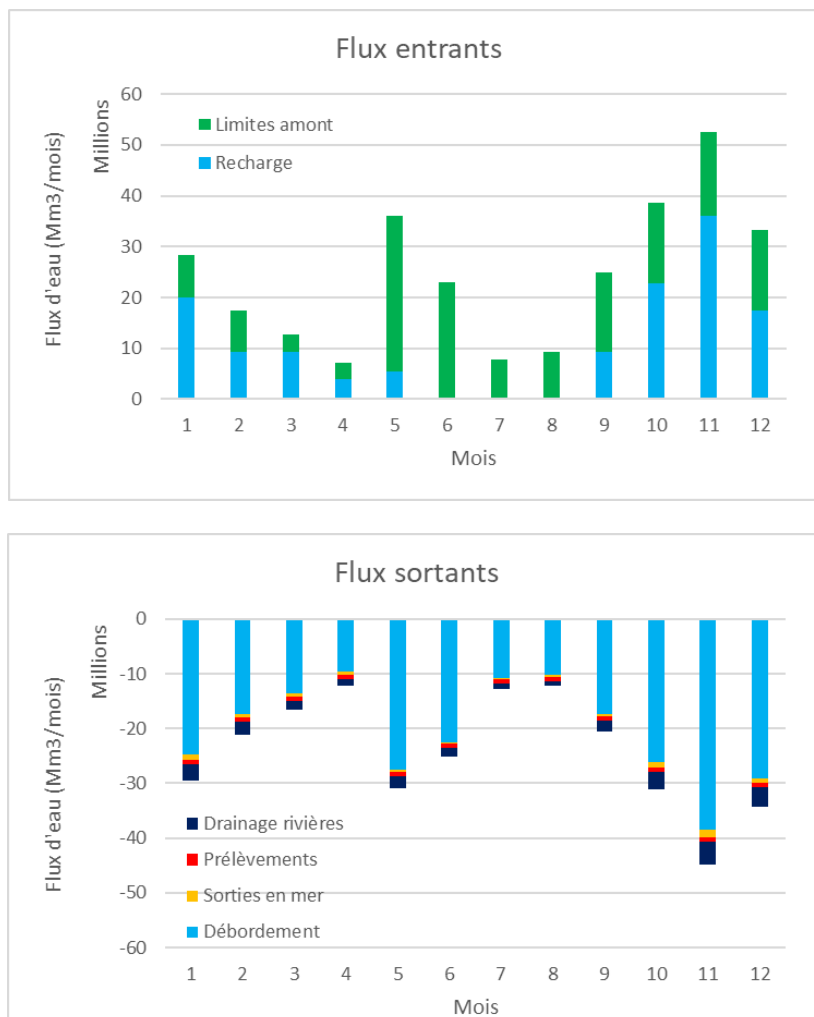


Illustration 37 – Évolution mensuelle des différents termes du bilan hydraulique de la nappe selon le modèle théorique transitoire « moyen »

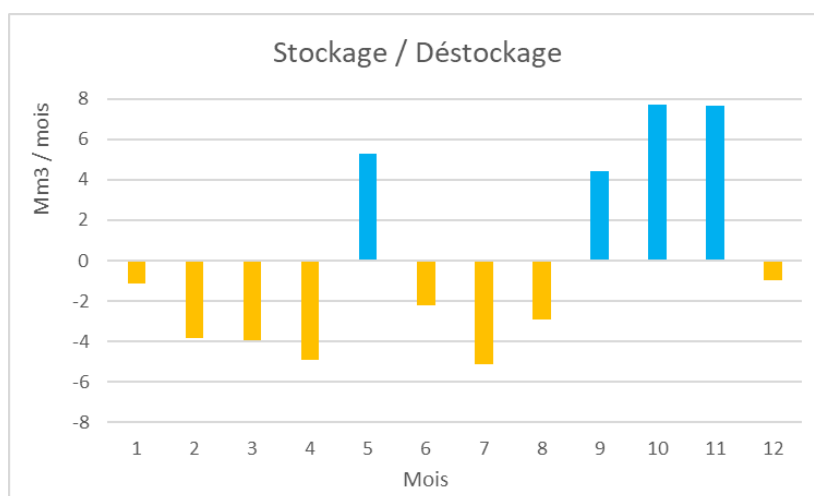


Illustration 38 – Évolution mensuelle du stockage / déstockage de l'aquifère alluviale selon le modèle théorique transitoire « moyen »

Battement annuel de la nappe

À titre d'exemple, l'illustration 39 présente des chroniques piézométriques simulées au droit de quatre zones d'intérêt du projet AVANSE, avec d'ouest en est : Grande Rivière du Nord, Caracol, Terrier Rouge et Ouanaminthe. Ces dernières sont identifiées sur la carte de l'illustration 40.

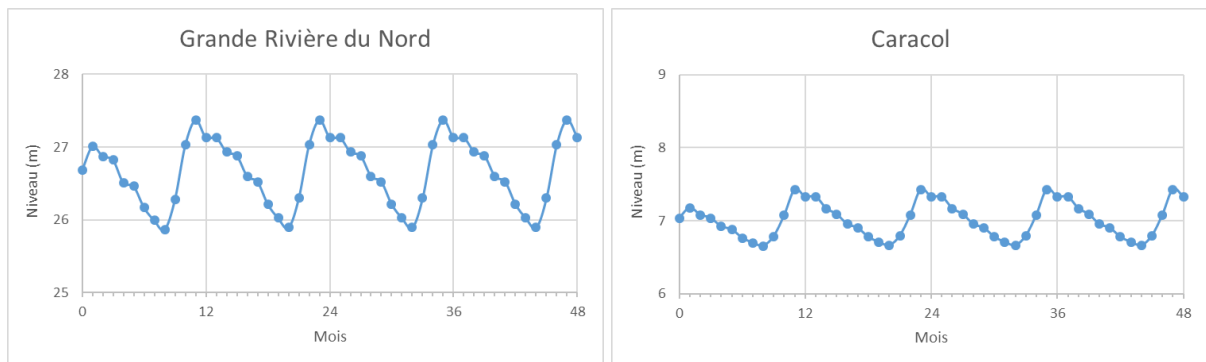
Dans la configuration du modèle transitoire « moyen », et en cohérence avec les phases de stockage / déstockage de l'aquifère décrites précédemment, les hautes eaux de la nappe alluviale sont atteintes au mois de novembre tandis que les plus basses eaux sont simulées au mois d'août. Il est intéressant de noter que le stockage d'eau simulé au cours du mois de mai ne se traduit pas par une hausse généralisée des niveaux piézométriques. En effet, le remplissage de l'aquifère ne concerne alors que l'extrémité amont de la plaine.

La période de recharge de la nappe (remplissage de l'aquifère) s'étale sur trois mois, de septembre à novembre, tandis que la période de vidange est simulée de décembre à août.

L'illustration 40 présente la carte du battement annuel simulé en régime transitoire « moyen » (différence entre les niveaux piézométriques du mois de novembre et ceux du mois d'août).

Le battement annuel de la nappe alluviale atteint des valeurs supérieures à 4 m au pied de la montagne de Cap Haïtien et plus ponctuellement au pied des reliefs du massif du Nord. Pour le reste, la grande majorité de la nappe alluviale (80 % du domaine modélisé) est concernée par des battements annuels inférieurs à 2 m. La moitié du domaine présente un battement de nappe inférieur à 1 m (Illustration 40).

Parmi les zones AVANSE, seules les parcelles de Terrier Rouge seraient concernées par des battements annuels supérieurs à 2 m (Illustration 39).



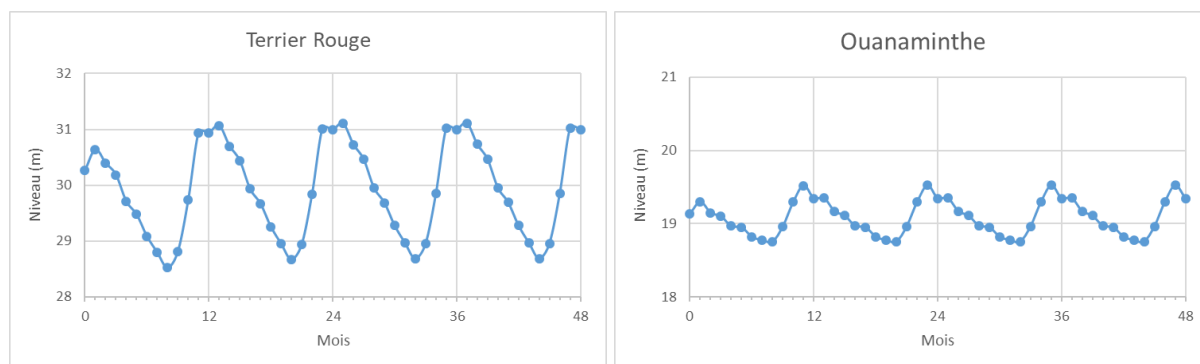


Illustration 39 – Exemples de chroniques piézométriques simulées par le modèle théorique transitoire « moyen »

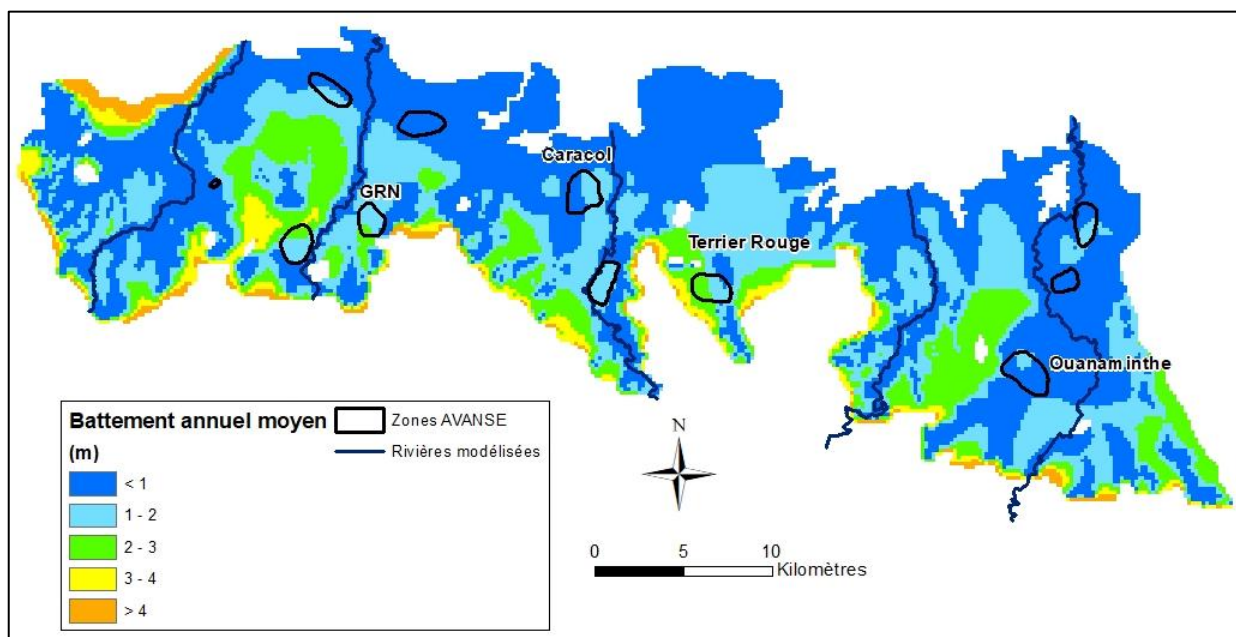


Illustration 40 – Carte du battement annuel moyen de la nappe alluviale simulée par le modèle théorique transitoire « moyen »

5.2. REGIME TRANSITOIRE « 2000-2016 »

5.2.1. Description du modèle

Il s'agit d'un modèle théorique en régime transitoire, **au pas de temps mensuel, sur la période 2000 - 2016**, soit 204 pas de temps de calcul.

Les conditions initiales correspondent également à l'état simulé en régime permanent.

Pour les débits entrant par les limites du modèle, les flux imposés mensuellement dans le modèle précédent sont conservés. En effet, faute d'information sur la période 2000-2016, la variabilité climatique n'est pas considérée pour les limites amont : chaque mois de janvier est donc associé aux mêmes apports en provenance du massif du Nord, etc.

En revanche, **la variabilité temporelle de la recharge météorologique est prise en compte** sur la base d'un calcul de pluies efficaces au pas de temps mensuel sur la période 2000-2016 à partir des données de pluies enregistrées à Cap Haïtien et à Terrier Rouge (source : USAI / MARNDR) et des ETP mensuelles moyennes calculées par la FAO. Dans le but d'aboutir à une chronique de recharge mensuelle sur la période 2000-2016, un coefficient correcteur est appliqué à la recharge mensuelle moyenne selon la formule suivante :

$$R_i = [\text{PEFF}(i) / \text{PEFFmoy}(j)] * R_{\text{moy}}(j)$$

Avec $\text{PEFF}(i)$ = pluie efficace calculée pour le mois i avec $i = 1$ à 204
 $\text{PEFFmoy}(j)$ = pluie efficace mensuelle moyenne calculée sur 2000-2016 ($j = 1$ à 12)
 $R_{\text{moy}}(j)$ = recharge mensuelle moyenne utilisée dans le modèle transitoire moyen ($j = 1$ à 12).

Une chronique de recharge au pas de temps mensuel (2000-2016) est ainsi affectée à chacune des cinq zones de recharge identifiées dans le modèle (Illustration 12). La variabilité temporelle issue des calculs pour Cap Haïtien est affectée aux zones 1, 3 et 4 tandis que la variabilité temporelle calculée pour Terrier Rouge est affectée aux zones 2 et 5.

5.2.2. Résultats

Recharge météorique

Cette approche permet de reproduire certaines périodes de sécheresse, en particulier celle observée entre 2014 et 2016. En effet, conformément à la réalité, la recharge météorique introduite dans le modèle est largement déficitaire entre 2014 et 2016, voire nulle sur la plaine des bassins versants de Haut-du-Cap et de Grande Rivière du Nord (Illustration 41).

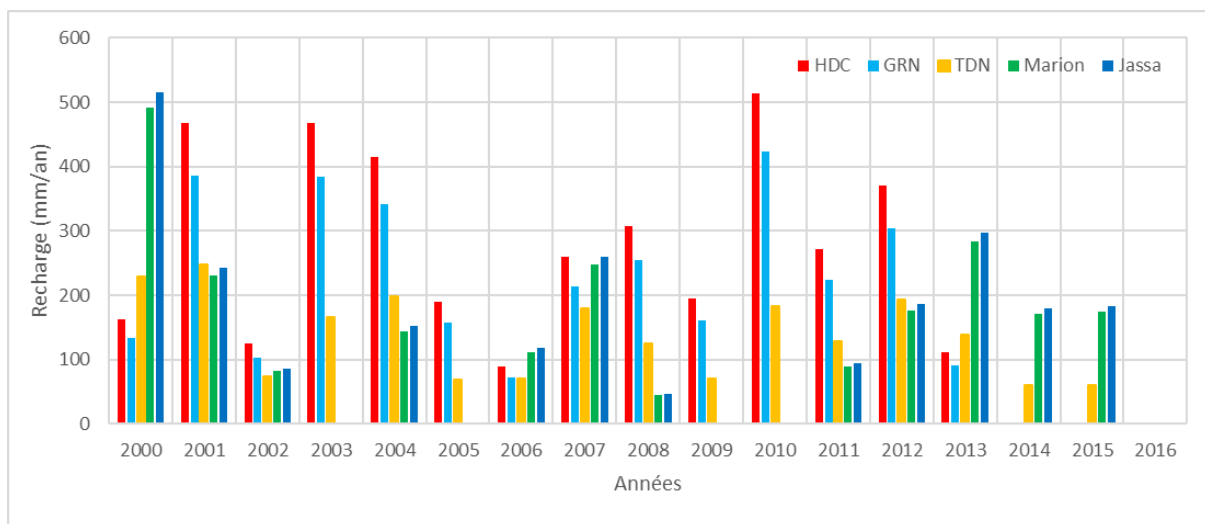


Illustration 41 – Évolution de la recharge météorique annuelle dans la configuration du modèle transitoire « 2000-2016 »

Stockage / déstockage

L'Illustration 42 présente l'évolution cumulée du stock d'eau contenu dans l'aquifère alluvial au pas de temps mensuel sur la période 2000-2016.

Comme vu précédemment, on peut constater une alternance saisonnière de phases de stockage / déstockage, en réponse à la variabilité des apports par infiltration des précipitations sur la plaine et des apports en provenance du massif du Nord. À l'échelle du modèle, le stock d'eau reste globalement positif à l'exception des années 2006, 2011 et 2016 (Illustration 42).

À partir de début 2015, dans un contexte de recharge déficitaire, une absence de remplissage de l'aquifère conduit à un déstockage quasi continu sur deux années.

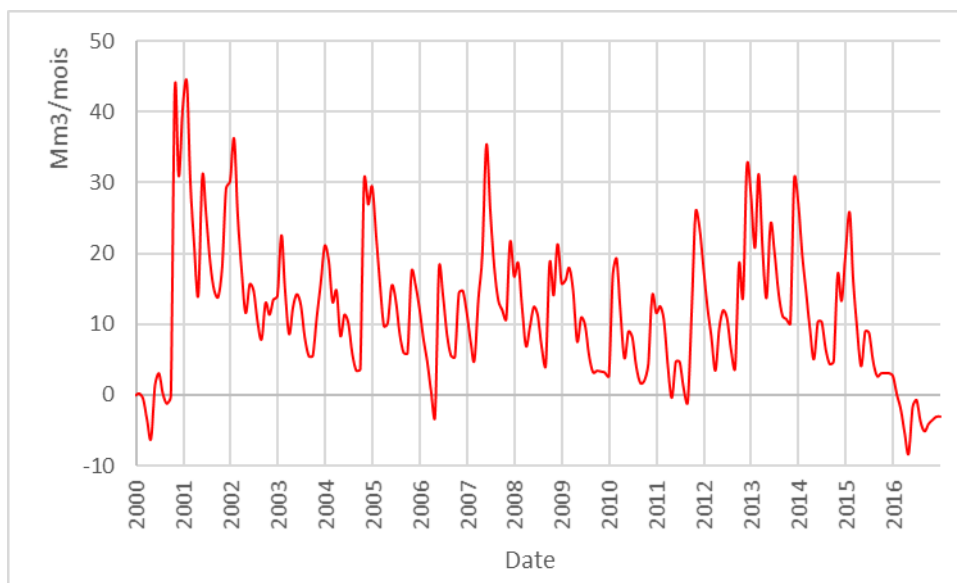


Illustration 42 – Évolution cumulée du stock d'eau dans l'aquifère alluvial sur la période 2000-2016

Piézométrie

La piézométrie simulée montre des fluctuations saisonnières d'amplitude variables en fonction de l'hétérogénéité interannuelle de la recharge. Au nord-est, les années de pluviométrie déficitaire se marquent par l'absence de remontée du niveau piézométrique. À partir de 2015, la succession de deux années sèches (initiée en 2013 ou 2014 selon les zones climatiques cf. Illustration 41) se marque par la vidange quasi continue de l'aquifère alluvial et se traduit par l'absence de hausse des niveaux piézométriques (Illustration 43).

À Terrier Rouge et à Grande Rivière du Nord dans une moindre mesure, à l'extrémité amont de la plaine, une chute des niveaux piézométriques est simulée à partir de début 2014. En l'absence de précipitations sur la plaine, les apports d'eau par le massif du Nord n'apparaissent pas suffisants pour maintenir un certain niveau de remplissage dans l'aquifère alluvial.

Dans les exemples de Caracol et Ouanaminthe, un niveau piézométrique de base est mis en évidence (Illustration 43). Ce niveau de base correspond au niveau vers lequel tend asymptotiquement la nappe en l'absence d'alimentation par les précipitations au droit de la plaine.

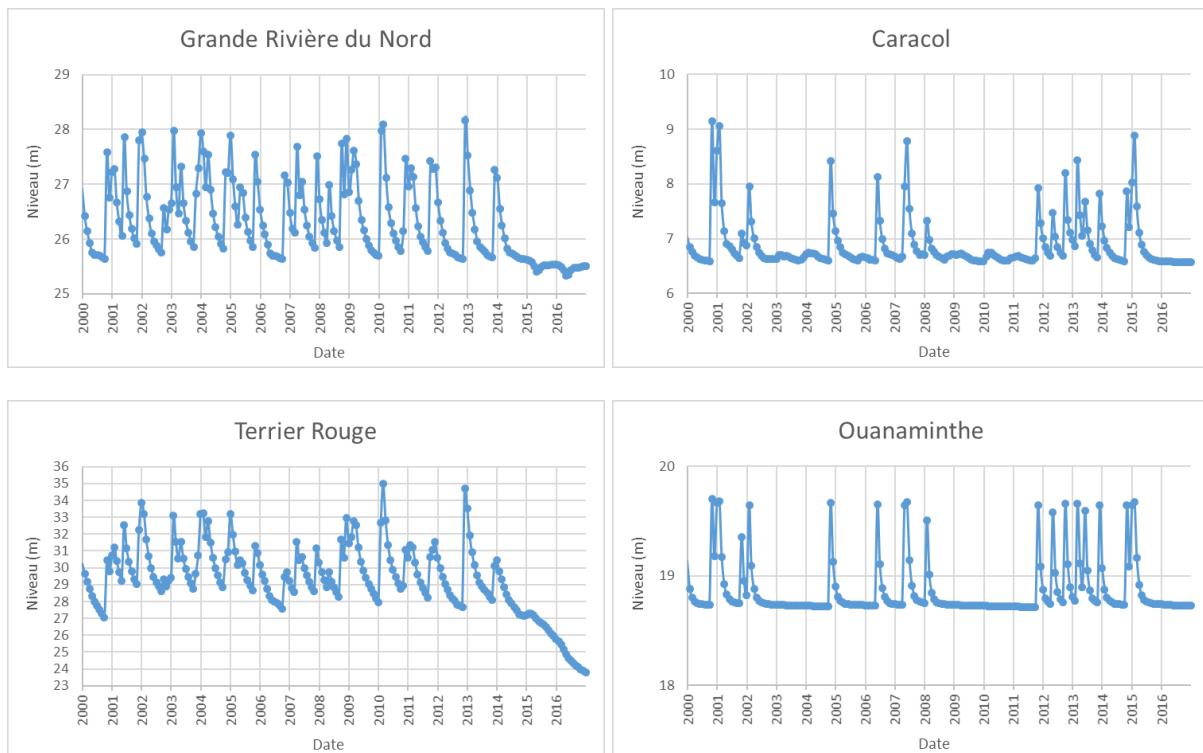


Illustration 43 – Exemples de chroniques piézométriques simulées par le modèle théorique transitoire « 2000-2016 »

L'illustration 44 présente la carte piézométrique simulée pour le mois de juin 2016. Il est intéressant de noter que, dans un contexte de recharge déficitaire, la dépression piézométrique de Cap Haïtien se creuse, avec en particulier des niveaux de nappe inférieurs au niveau de la mer. Dans de telles situations de basses eaux, le risque d'intrusion saline est inévitablement accru dans les secteurs où la nappe est exploitée.

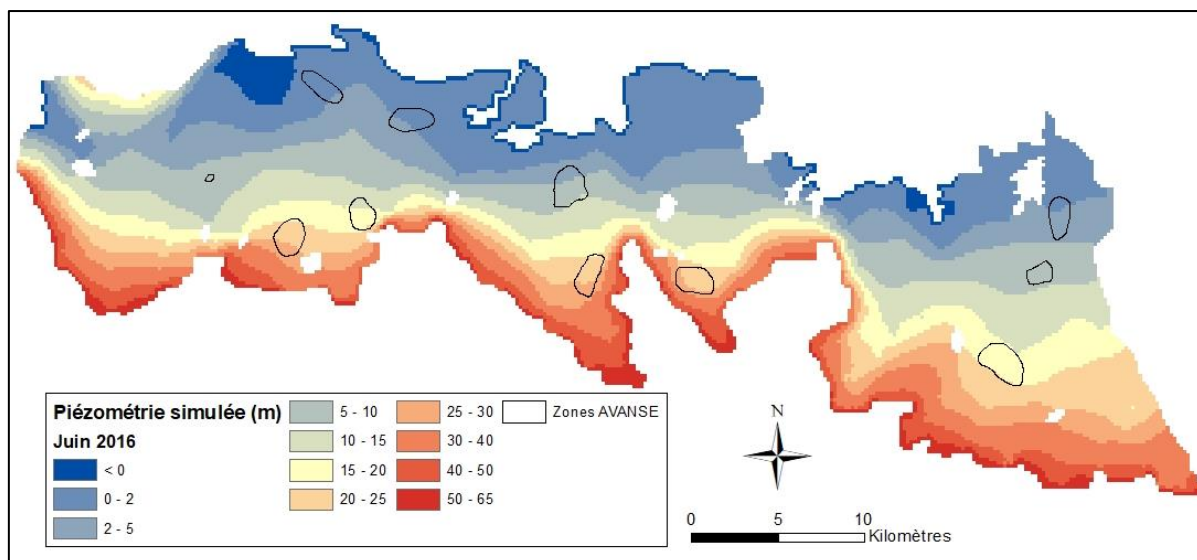


Illustration 44 – Carte piézométrique simulée par le modèle théorique transitoire « 2000-2016 » pour le mois de juin 2016

5.3. SIMULATION D'UN SCENARIO DE POMPAGES AGRICOLES

5.3.1. Description du scénario simulé

Dans ce scénario d'exploitation du modèle, dimensionné par AVANSE, il est supposé que les onze zones d'intérêt du projet sont cultivées en banane. Les besoins en eau sont fournis par la FAO ; en Haïti, la période d'irrigation s'étale de juin à octobre pour une année moyenne (Illustration 45).

L'irrigation est satisfaite par l'implantation de forages, avec une densité d'un ouvrage par parcelle de 10 ha. Un total de 270 forages a ainsi été implémenté dans le modèle afin de répondre aux besoins en eau des zones identifiées par le projet AVANSE.

Sur la base de ces hypothèses, le débit de production unitaire d'un forage d'irrigation varie entre 2.2 m³/h (juin) et 13.6 m³/h (juillet) (Illustration 45).

Mois	Besoin en eau bananeraie (mm/mois)	Débit pour 10 ha (m ³ /h)
Juin	15.9	2.2
Juillet	100.9	13.6
Août	85.6	11.5
Septembre	59.1	8.2
Octobre	28.8	3.9

Illustration 45 – Besoins en eau de la banane (source : FAO)

Dans les conditions actuelles d'exploitation de la nappe, les prélèvements en eau souterraine intégrés dans le modèle représentent un volume mensuel constant de 789 528 m³. Avec la mise en service de 270 forages agricoles, la pression exercée sur la nappe est très significativement augmentée, en particulier au plus fort de la période d'irrigation (juillet / août). Tous usages confondus, les prélèvements sont ainsi portés à un maximum de l'ordre de 3.5 Mm³/mois en juillet (Illustration 46).

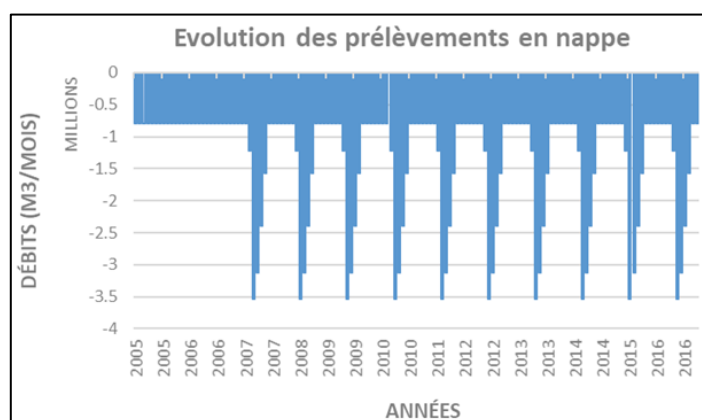


Illustration 46 – Évolution des prélèvements en nappe dans le cas du scénario relatif à l'irrigation des zones du projet AVANSE

On utilise le modèle transitoire « 2000-2016 », dans lequel les forages agricoles sont mis en service à partir de 2007. Afin de mesurer l'impact de ce scénario de pompage sur la ressource en eau de la nappe alluviale, on compare la simulation de référence (sans prélèvement agricole) et la simulation prospective sur la période 2007-2016, soient 10 années.

5.3.2. Résultats

L'illustration 47 présente une cartographie des rabattements de la nappe générés sous l'effet des pompages agricoles (270 puits répartis au droit des zones AVANSE) pour le mois d'août 2009.

On peut tout d'abord remarquer que les baisses piézométriques se propagent au-delà des seules parcelles concernées par les pompages.

Les impacts sont plus ou moins marqués d'une zone à l'autre. Les rabattements apparaissent plus limités au droit des secteurs de Cap Haïtien et de Limonade, avec respectivement des maximums simulés de l'ordre d'1 m et de 0.7 m (Illustration 47). Au contraire, les baisses de la piézométrie sont plus fortes pour les zones de Caracol, Terrier Rouge et Ouanaminthe, avec des rabattements pouvant dépasser 4 m et atteindre jusqu'à 6 m à Caracol.

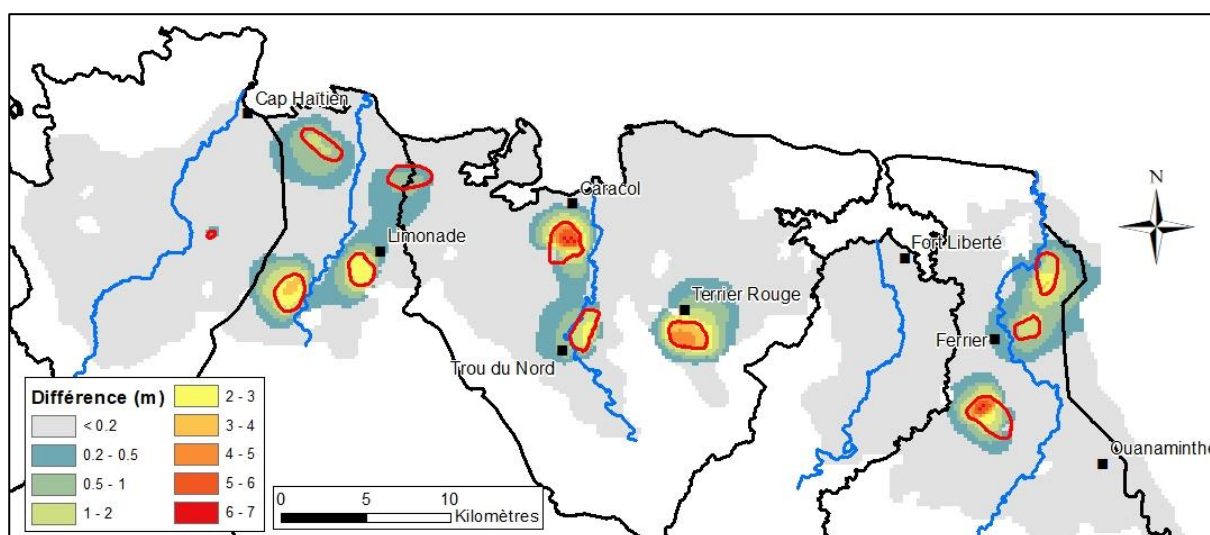


Illustration 47 – Impact des pompages agricoles sur la piézométrie de la nappe alluviale pour le mois d'août 2009

Les rabattements précédemment discutés correspondent à des valeurs moyennes par maille du modèle (200m x 200m). Le rabattement que l'on observerait réellement au droit d'un ouvrage de petit diamètre est plus important. À partir de la formulation de Sauty J.-P. (1973), MARTHE permet d'ajouter un terme correctif δH dépendant du rayon du puits, du côté de la maille, du débit de pompage et de la transmissivité de l'aquifère :

$$\delta H = \frac{Q}{2\pi T} \cdot \left(\ln \left(\frac{a}{r_p} \right) - \frac{\pi}{2} \right)$$

Les graphiques de l'illustration 48 intègrent ce facteur correctif et correspondent ainsi à l'évolution de la charge hydraulique au droit des puits de pompage. L'hypothèse d'un diamètre d'1 m a été retenue pour tous les ouvrages.

Par contre, il faut garder à l'esprit qu'un modèle hydrodynamique ne permet pas de prendre en compte les pertes de charges quadratiques pouvant également induire un rabattement additionnel (lié à l'écoulement turbulent dans les crépines et le massif filtrant).

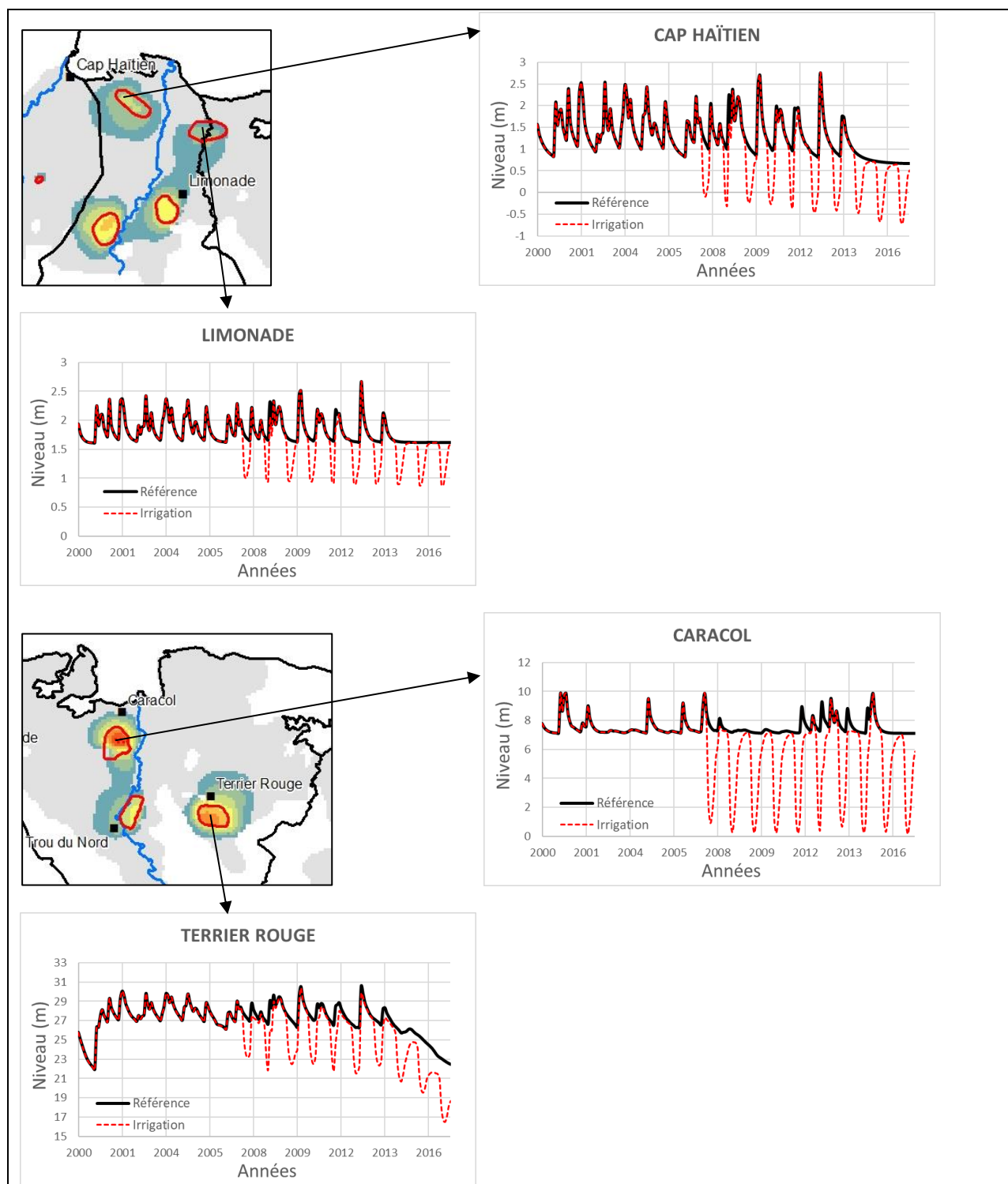


Illustration 48 – Impact des pompages agricoles au droit des puits (diamètre = 1 m)

Quoi qu'il en soit, il est intéressant de souligner que les niveaux piézométriques simulés remontent dès l'arrêt de l'irrigation pour atteindre rapidement les niveaux de la simulation de référence (Illustration 48). Cela reste vrai en période de basses eaux marquées (2014-2016), à l'exception de certains secteurs situés à l'extrémité amont de la plaine (exemple de Terrier Rouge, Illustration 48). Pour ces derniers, les apports d'eau par le massif du Nord n'apparaissent pas suffisants pour satisfaire les pompages agricoles en condition de faible recharge.

Enfin, d'un point de vue opérationnel, les deux principales contraintes d'exploitation mises en évidence par la simulation d'un tel scénario de pompage sont les suivantes :

- Localement, en bordure littorale, des difficultés d'exploitation pourraient être rencontrées en raison d'un risque non négligeable d'intrusion saline. En effet, sous l'effet des pompages agricoles, des phénomènes d'upconing⁷ et/ou d'inversion du sens d'écoulement de la nappe ne sont pas exclus. Une attention particulière est à porter aux zones de Cap Haïtien et de Caracol.
- Les rabattements simulés sont de plusieurs mètres dans la majorité des cas (sans prise en compte des pertes de charges quadratiques). Il est donc vraisemblable qu'il ne soit pas possible de s'appuyer sur les puits de faibles profondeurs existants sur le terrain pour satisfaire les besoins en eau des cultures. D'après le modèle, les zones les plus sensibles seraient celles de Caracol, Terrier Rouge ou encore Ouanaminthe.

⁷ Remontée de l'interface eau douce / eau salée sous l'effet d'un pompage

6. Conclusions et perspectives

Un modèle hydrodynamique de la Plaine du Nord d'Haïti a pu être construit sur la base des données disponibles et/ou acquises au cours du projet AVANSE. Dans la mesure du possible, cette première version du modèle doit s'inscrire dans la durée et évoluer avec l'amélioration des connaissances hydrogéologiques et climatiques.

Le code de calcul MARTHE permet d'envisager tout type d'évolution du modèle : maillage, nombre de couches, actualisation des prélèvements, ajustement des paramètres de calage, etc. Les actions de formation menées tout au long du projet de modélisation devraient, par ailleurs, faciliter les mises à jour futures du modèle.

Dans sa version actuelle, le modèle permet d'ores et déjà d'apporter un éclairage nouveau sur la ressource en eau souterraine de la plaine alluviale. Celui-ci peut ainsi aider à planifier le renforcement de l'exploitation de la nappe. Tout d'abord, l'établissement du bilan hydraulique de la nappe en régime permanent met en avant :

- ✓ Une disponibilité encore significative de la ressource en eau souterraine à l'échelle de la plaine, sans écarter localement des difficultés d'exploitation.
- ✓ Des échanges nappe-rivière qui se font très majoritairement dans le sens de la nappe vers les cours d'eau.
- ✓ Un poids des prélèvements en nappe plus important sur le bassin versant de Haut-du-Cap, principalement du fait des pompages pour l'alimentation en eau potable de Cap Haïtien.
- ✓ Une alimentation plus limitée de la nappe au sein du bassin versant de la rivière Marion, aussi bien en termes de recharge météorique que de flux d'eau en provenance du massif du Nord.

En outre, d'un point de vue plus opérationnel, les modélisations théoriques réalisées en régime transitoire ainsi que la simulation d'un scénario d'irrigation fournissent des éléments sur lesquels le projet AVANSE pourra s'appuyer pour pré-dimensionner un dispositif d'irrigation :

- ✓ Les conditions d'alimentation de la nappe alluviale semblent autoriser la mise en service de pompages agricoles sur les différentes zones d'intérêt du projet. Une reconstitution rapide de la réserve en eau est notamment simulée après arrêt de la campagne d'irrigation. C'est également le cas en période de sécheresse, à l'exception des zones situées sur l'extrémité amont de la plaine.
- ✓ Les rabattements de nappe simulés au droit des puits de pompages sont pluri-métriques, jusqu'à 6-7 m, et se propageraient au-delà des zones de culture. De tels rabattements ne permettraient pas de s'appuyer sur les puits très peu profonds existants sur le terrain. L'implantation de forages plus profonds (> 20m) sera probablement à envisager, d'autant plus dans un contexte de basses eaux comme celui observé entre 2014 et 2016.
- ✓ Les zones de Cap Haïtien et de Caracol sont plus particulièrement vulnérables à une intrusion d'eaux salines en provenance de l'océan. Le risque est bien entendu accru sous l'effet des pompages, et en condition de recharge déficitaire.

Comme tout modèle hydrodynamique, le modèle maillé de la Plaine du Nord présente des incertitudes et des limites d'utilisation qu'il convient de garder à l'esprit, en particulier dans un contexte où les données disponibles et les connaissances restent partielles :

- ✓ En l'absence de chroniques piézométriques et pluviométriques, le calage du modèle de nappe n'a pu être conduit qu'en régime hydraulique permanent. Il ne s'agit que d'une première étape de travail qui devra être complétée par un calage en régime transitoire permettant notamment de prendre en compte les capacités de stockage / déstockage de l'aquifère.
- ✓ Concernant la piézométrie de la nappe alluviale, peu d'observations de terrain sont disponibles sur l'extrémité amont de la plaine ainsi que sur le bassin versant de la rivière Marion et sur la moitié est du bassin de Trou du Nord. L'acquisition de données de référence supplémentaires dans ces secteurs permettrait de consolider le calage de la piézométrie en régime permanent.
- ✓ La méconnaissance des paramètres descriptifs du réseau hydrographique modélisé induit des incertitudes dans le calcul des échanges nappe-rivière, en particulier les cotes du fil d'eau et du fond du lit des rivières. Une campagne de levés topographiques (profils en travers) a été lancée fin 2017 par le projet AVANSE, les données en cours d'acquisition pourront utilement être intégrées dans le modèle.
- ✓ Dans le même ordre d'idée, les écoulements superficiels ne peuvent être considérés comme calés en l'absence d'un travail en régime transitoire. Aussi, les flux d'échange modélisés entre les cinq cours d'eau principaux et la nappe alluviale sont à considérer avec précaution ;
- ✓ Les apports par le domaine extérieur, principalement par les eaux ruisselées sur le massif du Nord dans notre cas, sont toujours difficilement quantifiables sur le terrain. Cependant, afin de valider les calculs du modèle vis-à-vis des flux entrants par l'amont, l'acquisition continue de données hydro-climatiques est préconisée, avec *a minima* le suivi 1) des débits des principaux cours d'eau à leur débouché dans la plaine, 2) des fluctuations piézométriques sur l'amont de la plaine alluviale et 3) des précipitations sur le massif.
- ✓ La connaissance des prélèvements, en nappe comme en rivière, reste incomplète. Certains ouvrages récents ont possiblement échappé à l'inventaire réalisé (parc industriel de Caracol, grandes exploitations agricoles, etc.). Des travaux d'enquête complémentaires seraient à envisager, les nouvelles données acquises pourront aisément être introduites dans le modèle.

À ce stade, la consolidation du modèle nécessite de pérenniser un programme de surveillance des ressources en eau et du climat. En particulier, il est recommandé :

- ✓ De mettre en place des stations hydrométriques sur les principaux cours d'eau de la plaine, sur des sections amont et aval. À défaut, les campagnes de jaugeage hebdomadaires réalisées par DAI devront être poursuivies.
- ✓ De mettre en œuvre un réseau de surveillance piézométrique permettant l'enregistrement en continu des fluctuations de la nappe dans différents contextes (amont / aval, à différentes distances des cours d'eau). Un tel suivi apporte des éléments de compréhension précieux quant à la dynamique saisonnière de la nappe, aux échanges nappe-rivière et aux apports par l'amont. En bordure littorale, il est préconisé de compléter cette surveillance par un suivi de la conductivité électrique de l'eau. Un tel dispositif est,

en effet, essentiel pour comprendre les mécanismes d'une éventuelle salinisation des eaux souterraines, en lien avec les prélèvements, la recharge et les écoulements (niveau marin, gradient hydraulique, cours d'eau, etc.).

- ✓ De maintenir le réseau de pluviomètres installés dans le cadre du projet AVANSE, à la fois au droit de la plaine alluviale et sur les reliefs du massif du Nord. Dans la mesure du possible, des mesures de l'ETP pourraient également être envisagées : une au niveau de la plaine et une seconde sur les hauteurs.

Le modèle a été archivé sur les ordinateurs de DAI, de l'Université de Port-au-Prince et de l'Université de Limonade les 12 et 14 décembre 2017, conformément au planning et aux dispositions contractuelles.

7. Bibliographie

Adamson J., Jean-Baptiste G., Miner W.-J. (2016) – Summary of groundwater resources in Haïti. The Geological Society of America. Special paper 520.

Arnaud L. (2017) – Modélisation hydrodynamique de la Plaine alluviale du Nord – République d'Haïti. Assistance technique du BRGM. Rapport BRGM/RC-67037-FR, 55 pages, 14 figures, 4 tableaux, 5 annexes.

Barthélémy Y., Seguin J.-J. (2015) – Modélisation maillée des écoulements souterrains. Principes, démarche et recommandations. Rapport BRGM/RP-62549-FR.

BDPA (1983) – Cartographie thématique d'Haïti.

BRGM (1977) – Les ressources en eau souterraine de la République de Haïti. Etat des connaissances. Rapport BRGM 77 AGE 27.

BRGM (1980) – Reconnaissance géophysique des alluvions de la Plaine du Nord.

BRGM (1988) – Synthèse géologique de la République d'Haïti. Rapport BRGM 88 HTI 124 GEO.

BRGM (1989) – Etude des ressources en eau de la région de Port-au-Prince. Volet A : ressources en eau, rapport de synthèse et modélisation. Volet C : conditions d'exploitation des ressources disponibles. Rapport BRGM/89-HTI-146-EEE.

Bureau des Mines et de l'Energie (2005) – Notice explicative de la carte géologique d'Haïti au 1 / 250 000ème.

Centre d'Etudes de Géographie Tropicale et Université de Bordeaux 3 (1985) – Atlas d'Haïti.

DINEPA (2013) – Fascicule technique. Conception des réseaux d'adduction et des réseaux de distribution d'eau potable.

Gutierrez A. (2010) - Etude de faisabilité pour la réhabilitation, l'extension du système AEP, la réalisation du système d'assainissement des rejets liquides et la supervision de travaux de la ville de Cap Haïtien. Inventaire des points d'eau. Note BRGM.

Gutierrez A., Gourcy L., Braibant G. (2012) – Etude de faisabilité pour la réhabilitation, l'extension du système AEP, la réalisation du système d'assainissement des rejets liquides et la supervision de travaux de la ville de Cap Haïtien. Caractérisation géochimique des eaux. Rapport BRGM.

LGL (1977). Agence Canadienne de Développement international (ACDI). Projet d'inventaire des ressources hydrauliques. Annuaire hydrologique, République d'Haïti, 620 pages.

Ménanteau L. et Vanney J.-R. (1997) – Atlas côtier du Nord-Est d'Haïti. Environnement et patrimoine culturel de la région de Fort-Liberté.

Ministère de l'Agriculture, des Ressources Naturelles et du Développement Rural. Service Nationale des Ressources en Eau / Nations Unis (1990) – Carte hydrogéologique de la République d'Haïti.

OXFAM / CATIE (2011) - Réalisation d'études techniques et Élaboration de plans d'Aménagement pour trois bassins versants prioritaires dans le cadre du Programme de Mitigation des Désastres Naturels. Rapport Final du Diagnostic du Bassin Versant Grande Rivière du Nord. PMDN/MARNDR/AOI001/08.

Radstake F. (1990) – Prospection géophysique dans la Plaine du Nord, Haïti, rapport provisoire, PNUD-DTCD, HAI/86/003 N° 21.

Tomasi B. (1990) – Inventaire des points d'eau de la région Nord. Programme des Nations Unis pour le Développement (PNUD) / Ministère de l'Agriculture, des ressources naturelles et du développement rural. Service Nationale des Ressources en Eau. Rapport HAI/86/003 n° 31.

Tomasi B. (1990) – Forages de reconnaissance et pompages d'essai dans la Plaine du Nord. Programme des Nations Unis pour le Développement (PNUD) / Ministère de l'Agriculture, des ressources naturelles et du développement rural. Service Nationale des Ressources en Eau. Rapport HAI/86/003 n° 32.

Tomasi B. (1990) – Ressources et besoins en eau d'Haïti. Volume 1 : Région Nord. Programme des Nations Unis pour le Développement (PNUD) / Ministère de l'Agriculture, des ressources naturelles et du développement rural. Service Nationale des Ressources en Eau. Rapport HAI/86/003 n° 33.

United States Southern Command (1999) – L'évaluation des ressources d'eau d'Haïti.

Annexe - Comptes-rendus de mission

Réf. : CR1

Orléans, le 17/07/2017

COMPTE RENDU DE MISSION	
Rédacteur : L. ARNAUD BRGM/D3E/GDR	Entité :
Projet : Modélisation hydrodynamique de la Plaine du Nord (Haïti). Assistance technique du BRGM.	Numéro : C117D3E003
Objet : Mission n° 2 – Construction du modèle hydrogéologique	
Date : 10/07 au 15/07/2017	Lieu : Port-au-Prince
Participants : Gabriel-Henry FRENOT, Carmelo JEAN-LOUIS, Fanuel PIERRE + Emmanuel (Université de PaP), Wanson SYLVAIN (Université de Limonade), Vanessa FILIPPINI, Jacqueline PIERRE, Alcé SAMUEL PAUL, Inès ZEGOULLI + Joel (DAI / AVANSE)	
Diffusion interne : Alexis GUTIERREZ, Pascal AUDIGANE, Jean-Philippe RANÇON Diffusion externe : Jonathan GREENHAM, Inès ZEGOULLI, Vasty GUERRIER (DAI) En cas de diffusion externe visa et nom du responsable : Pascal AUDIGANE	

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS
1 – Introduction L'objectif du présent compte-rendu est : 1) de décrire sommairement les travaux réalisés durant la deuxième mission du BRGM à l'Université de Port-au-Prince, mission consacrée à la construction du modèle hydrogéologique de la Plaine du Nord ; 2) de récapituler les actions qu'il reste à réaliser avant de pouvoir passer à la phase de calibration du modèle.
2 – Travaux réalisés • Délimitation de l'extension horizontale du modèle à partir de la carte géologique numérique (CNIGS) sous ArcGis. L'extension a été révisée en cours de construction, notamment en amont où la cartographie des alluvions présente certaines incohérences comparativement à la topographie et à l'Est afin de considérer une limite physique (bassin versant) et non la frontière administrative. • Création du projet de modélisation sous MARTHE, avec en première approche, une structure monocouche et un maillage constitué de cellules carrées de 200 m de côté. • Pré-traitement du MNT (Modèle Numérique de Terrain) au pas de 5 m fourni par l'intermédiaire du BRGM et du MNT au pas de 90 m (SRTM) sous ArcGis avant importation dans MARTHE. Un document descriptif des différentes opérations réalisées sous ArcGis sera

diffusé aux participants. Le MNT au pas de 5 m ne couvrant pas l'amont de la plaine alluviale, le MNT au pas de 90 m a été utilisé en complément.

- Import sous MARTHE de la topographie (toit de la couche modélisée). Pour chaque maille de 200 m de côté, la valeur minimale du MNT a été retenue.
- Krigeage sous ArcGis de la carte de profondeur du substratum, préalablement digitalisée par AVANSE.
- Import dans MARTHE des valeurs de profondeur du substratum, ensuite converties en altitude.
- Visualisation en coupe et en 3D du modèle (options non présentées lors de la première session de formation).
- Délimitation sous ArcGis des bassins versants de la zone d'étude. Plusieurs incohérences avaient, en effet, été constatées sur le fichier initialement collecté.
- Import de différentes couches d'informations numériques au format mif/mid pour habillage du modèle sous MARTHE (rivières, bassins versants, trait de côte, contours géologiques, etc.).
- Définition des conditions hydrauliques aux limites du modèle : conditions de flux nul sur les limites Est et Ouest, conditions de charges imposées pour la limite littorale et les limites d'affleurement (en amont, au pied des reliefs calcaires), conditions de charges imposées au droit des 5 principaux cours d'eau. Pour la simulation en régime transitoire, les limites à charges imposées devraient être remplacées par des limites à flux imposés.
- Intégration des conditions aux limites dans MARTHE. Les charges imposées ont été fixées à 0 m pour la limite littorale, à « topographie - 1m » pour les rivières et à une profondeur de 10 m pour la limite amont. Ces charges imposées seront ajustées en phase de calibration.
- Première simulation en régime permanent pour vérification de la bonne convergence des calculs. La convergence est bonne, et s'est en particulier améliorée suite aux modifications apportées délimitation amont.
- Application d'une recharge uniforme de 130 mm/an sous MARTHE. Cette valeur est issue de celle proposée par Tomasi en 1990. Cette valeur sera bien entendu précisée en phase de calibration. Il n'a pas été possible d'avancer davantage sur la question de la recharge faute de disponibilité des données (Cf. § 3 – Actions à mener).
- Compilation dans un fichier unique des différents niveaux piézométriques collectés et première analyse des données : corrélation Niveau/MNT, statistiques descriptives sur l'échantillon total et sur des échantillons distinguant les mesures faites en saison des pluies et en saison sèche.
- Création d'un fichier « mailles à historiques » dans MARTHE, mailles associées aux ouvrages disposant d'une mesure de niveau pour lesquelles un enregistrement des niveaux simulés est demandé. En chaque point, les niveaux simulés pourront ainsi être comparés aux niveaux observés.
- Développement d'une méthodologie permettant d'affecter des débits de prélèvement moyens aux ouvrages d'alimentation de la population (base de données Haïti Outreach). Un croisement des populations urbaines et rurales, des consommations respectives et de la localisation des puits a été effectué sous ArcGis. Certaines informations restent à recueillir concernant les prélèvements (Cf. § 3 – Actions à mener).
- Import dans MARTHE des prélèvements calculés.

- Nouvelle simulation en régime permanent. Contrôle de la convergence et première discussion autour du bilan hydraulique des flux (recharge, débordement, prélèvements, entrées / sorties par les limites, échanges nappes / rivières, etc.), de la piézométrie simulée (première confrontation à la carte dressée par Tomasi en 1990).
- La dernière version de ce premier modèle (AVANSE_V7) ainsi que l'ensemble des fichiers de travail associés (SIG, Excel) ont été remis à tous les participants le 14/07/2017. Le BRGM se chargera de déposer les fichiers sur le sharepoint du projet.
- Poursuite de la compilation des précipitations journalières. Les nouvelles données fournies par AVANSE ont été mises en forme et analysées. À ce stade, l'absence de chroniques journalières sur une durée minimale de 12 mois est constatée. D'autres informations restent à compiler (Cf. § 3).
- En complément, le BRGM a récupéré des pluies satellitaires sur le site du LAFDM : <http://stream.princeton.edu/LAFDM/WEBPAGE>. Après comparaison avec les données journalières disponibles au sol, des différences très significatives apparaissent (sans cohérence particulière). En outre, la variabilité climatique de la Plaine du Nord n'est pas retranscrite par les pluies satellitaires. Leur utilisation apparaît donc limitée. Une décision sera prise une fois la compilation terminée. Faute de données, il n'est pas exclu que la reconstitution de « pluies théoriques » soit utilisée pour la réalisation des simulations en régime transitoire.
- Il faut noter qu'à ce stade de la modélisation, la question des précipitations et des zones climatiques devrait être résolue, aussi, les derniers éléments d'informations devront impérativement être mis à disposition pour fin juillet 2017.
- Elaboration d'une deuxième version du modèle avec considération explicite du réseau hydrographique. Sur la base du tracé des 5 rivières principales digitalisé par AVANSE à partir des photographies aériennes, création dans MARTHE des différents champs d'information utilisés pour le calcul des débits de rivière : n° d'affluent et arbre de branchement, n° de tronçon, largeur et longueur de tronçons, cotes du fil d'eau et du fond de rivière, épaisseur et perméabilité de colmatage. Dans l'attente des données de terrain (profils topographiques en travers), des valeurs uniformes ont été affectées pour les différents champs.
- La construction du réseau hydrographique n'est pas terminée (Cf. § 3), l'objectif de ce premier travail était de former les étudiants de l'Université de Port-au-Prince dans l'hypothèse où une contribution complémentaire leur serait demandée début septembre après l'acquisition des profils en travers.

3 – Actions à mener

Collecte et acquisition de données :

Afin de ne pas remettre en cause le chronogramme prévisionnel, il est important que les données décrites ci-après soient fournies le plus rapidement possible (fin juillet 2017 pour certaines et fin août pour d'autres).

- Précipitations journalières sur plusieurs stations (Observatoire de la Sécurité Alimentaire) sur la période 2011-2012 à saisir sous MS Excel par les étudiants de Port-au-Prince (Fin juillet 2017).
- Données issues des 7 pluviomètres installés par AVANSE. Seuls 3 à 4 mois de données ont pour l'instant été mis à disposition (Fin juillet 2017).

- Enquêtes par les étudiants de Port-au-Prince sur les principaux prélèvements en nappe à usage industriel (Caracol, distillerie Larue, fabrique de glace, eau en sachet, aéroport...) (Fin août 2017).
- Enquête par les étudiants de Port-au-Prince auprès de la DINEPA pour récupération des volumes de production moyens des principaux forages AEP (Balan à Cap Haïtien, etc.) (Fin août 2017).
- Validation par les professeurs de l'Université de PaP des volumes affectés aux puits AEP (pompes à bras) (Fin juillet 2017).
- Résultats des jaugeages hebdomadaires réalisés par AVANSE (Fin août 2017). La remontée des données n'est que très partielle. Or, ces données sont capitales pour la calibration des débits simulés. D'autant plus qu'il a été acté qu'aucune autre chronique de débits (même anciennes) ne pourrait être récupérée.
- Compilation des résultats de pompages d'essai mis en œuvre par AVANSE (Fin août 2017).
- Récupération de la carte de la recharge spatialisée établie par J. Adamson (Fin juillet 2017). Ce dernier a donné son accord pour une mise à disposition du raster avant la fin du mois de juillet.
- Acquisition des profils topographiques en travers sur les 5 cours d'eau par AVANSE. Les données devront être mises à disposition de l'équipe de modélisation immédiatement après acquisition (Fin août 2017).
- Suivi piézométrique à une fréquence hebdomadaire sur une sélection d'une dizaine d'ouvrages à partir de début août. Les ouvrages sélectionnés devront être implantés dans des contextes différents : proche et éloigné des cours d'eau, aval / amont de la plaine.
- Délimitation des zones à enjeux du projet AVANSE (Fin août 2017).

Actions en lien avec la modélisation :

- Document récapitulatif des principales opérations réalisées sous ArcGis pendant la semaine (BRGM pour fin juillet 2017).
- Finalisation de la construction du réseau hydrographique pour la deuxième version du modèle (BRGM + Etudiants de PaP pour mi-septembre 2017).
- Discrétisation verticale du modèle en trois couches pour élaboration d'une 3^{ème} version du modèle.
- Import dans MARTHE des prélèvements éventuellement actualisés après enquêtes des étudiants de PaP (mi-septembre 2017).
- Décision sur les chroniques pluviométriques journalières et les zones climatiques à considérer après compilation des dernières données disponibles (BRGM + AVANSE pour fin août 2017).
- Calcul des précipitations efficaces (préparation BRGM + équipe de modélisation) et mise en forme des fichiers pour lecture par MARTHE (Fin septembre 2017).
- Calcul sous ArcGis de la répartition des flux d'eau entrant sur les limites d'affleurement (préparation BRGM + équipe de modélisation / Fin septembre 2017).

- Intégration dans MARTHE de la délimitation des bassins versants pour un calcul de bilan hydraulique individualisé (équipe de modélisation / fin septembre 2017).
- Création de mailles à historiques au droit des sections jaugées par AVANSE (équipe de modélisation / Fin septembre 2017).
- Analyse comparative des trois versions du modèle et sélection de la version la plus adaptée à la modélisation de la plaine du Nord (équipe de modélisation / Fin septembre 2017).
- Calibration du modèle en régime permanent (ajustement des champs de perméabilité pour l'essentiel) (préparation BRGM + équipe de modélisation / fin septembre 2017).
- Calibration du modèle en régime transitoire (préparation BRGM + équipe de modélisation / fin octobre 2017).
- Analyses de sensibilité (préparation BRGM + équipe de modélisation / novembre 2017).
- Rapport final de l'étude (BRGM, 18/12/2017).

Pascal Audigane

Responsable d'unité D3E/GDR



Le 17/07/2017 :

Réf. : CR2

Orléans, le 04/10/2017

COMPTE RENDU DE MISSION	
Rédacteur : L. ARNAUD BRGM/D3E/GDR	Entité :
Projet : Modélisation hydrodynamique de la Plaine du Nord (Haïti). Assistance technique du BRGM.	Numéro : CI17D3E003
Objet : Mission n° 2 – Calage du modèle hydrodynamique	
Date : 24/09 au 01/10/2017	Lieu : Port-au-Prince
Participants : Gabriel-Henry FRENOT, Carmelo JEAN-LOUIS, Fanuel PIERRE, Wanson SYLVAIN (Université de Limonade), Vanessa FILIPPINI, Jacquelin PIERRE, Inès ZEGOULLI + Joel SAINGER (DAI / AVANSE)	
Diffusion interne : Alexis GUTIERREZ, Pascal AUDIGANE, Jean-Philippe RANÇON Diffusion externe : Jonathan GREENHAM, Inès ZEGOULLI, Vasty GUERRIER (DAI) En cas de diffusion externe visa et nom du responsable : Pascal AUDIGANE	
RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS	
1 – Introduction L'objectif du présent compte-rendu est de : 3) faire le point sur les dernières données hydro-climatiques qu'il restait à collecter (Cf. CR de la mission n°2) ; 4) décrire sommairement les travaux réalisés durant la troisième mission du BRGM à l'Université de Port-au-Prince, mission consacrée à la finalisation de la construction du modèle hydrogéologique de la Plaine du Nord et à sa calibration ; 5) faire le bilan des actions restant à mener (calendrier prévisionnel).	
2 – Collecte de données Par rapport aux éléments attendus et à l'échéancier présenté à l'issue de la mission n°2, les données n'ont été fournies que partiellement et avec un retard parfois préjudiciable : • <u>Précipitations journalières</u> enregistrées sur les 7 pluviomètres AVANSE : les données sont encore incomplètes et restent en cours de validation. Au maximum, 5 mois de données devraient être disponibles sur 2 ou 3 stations. Celles-ci ne sont toujours pas exploitables, il n'est donc pas certain qu'elles puissent être valorisées dans le cadre du projet de modélisation ; • <u>Jaugeages hebdomadaires</u> réalisés par AVANSE sur les 5 principaux cours d'eau de la zone d'étude. Les données validées n'ont été fournies qu'au cours de la 3^{ème} mission : pour chaque station, un seul jaugeage par mois est disponible (de janvier à juillet) ; • <u>Résultats des pompages d'essai</u> mis en œuvre par AVANSE. Les données sont toujours en cours de validation. Encore une fois, il n'est pas certain que ceux-ci puissent être exploités compte tenu de l'avancement de l'étude (calage à finaliser pour le 31/10/2017) ;	

- Profils topographiques en travers des 5 cours d'eau : acquisition en cours de démarrage. Les données ne pourront pas être utilisées dans le modèle ;
- Suivi piézométrique à une fréquence hebdomadaire sur une sélection d'une dizaine de puits / forages : le suivi n'ayant pas démarré, il est fort probable que les données ne puissent être valorisées.

3 – Travaux réalisés

La troisième mission du BRGM s'est déroulée du 25/09 au 30/09 dans les locaux de l'Université de Port-au-Prince.

Finalisation de la construction du modèle :

- Prise en compte des intrusions de socle et de calcaire (exclues du domaine maillé).
- Révision du tracé de la rivière Jassa suite aux visites de terrain de DAI.
- Configuration du réseau hydrographique :
 - Affectation des longueurs de rivière à chaque tronçon (maille rivière) après calcul sous ArcGis ;
 - Affectation des largeurs de rivière à chaque tronçon après réalisation de profils en travers sous ArcGis ;
 - Cotes de fond des rivières : valeurs homogènes par cours d'eau, affectées après analyse des sections jaugées par DAI : hauteurs d'eau de 0.6 m pour la Grande Rivière du Nord, 0.4 m pour Haut du Cap, 0.3 m pour la Marion et la Jassa, 0.25 m pour Trou du Nord ;
 - Autres valeurs retenues à ce stade : cote du fil d'eau = topographie, perméabilité de colmatage = 1.10^{-6} m/s, épaisseur de colmatage = 1 m ;
 - Création du champ « Débit Amont (Source) de Rivière » : valeur du débit dans la maille amont de chaque cours d'eau à partir d'un calcul de pluie efficace sur la superficie du bassin versant intercepté (méthode du bilan de Thornthwaite).
- Création du champ « Directions aval de ruissellement » pour cheminement du débordement de nappe vers le réseau hydrographique en fonction de la topographie.
- Création du champ « Flux de recharge » à partir de la carte de recharge proposée par Adamson et al. (raster au pas de 30 m). Agrégation des valeurs selon 5 zones de recharge.
- Création de 12 nouvelles mailles à Historique pour le suivi des débits de rivière (section de jaugeage DAI + stations historiques).

Préparation de la phase de calibration du modèle hydrodynamique :

- Synthèse des données piézométriques recueillies après prise en compte des derniers relevés transmis par DAI (en cours de mission).
- Révision de la carte piézométrique réalisée par Tomasi et al. (1990) sur la base de la carte piézométrique proposée par le BRGM en 2010 (région de Cap Haïtien) et des niveaux piézométriques compilés. Piézométrie de référence pour la calibration en régime hydraulique permanent.
- Préparation de fichiers Excel permettant l'analyse des résultats de simulation en termes de piézométrie et de débit de rivière.
- Première estimation des débits entrants dans le modèle par les limites à charge imposée sur la base d'un calcul de pluies efficaces (rapportées aux superficies drainées en amont). Ce premier calcul fournit les ordres de grandeur à respecter par le modèle.

- Création du champ « Zones de géométrie » (1 zone pour chacun des 5 bassins versants principaux) pour permettre le calcul d'un bilan hydraulique par bassin versant.

Calibration du modèle hydrodynamique en régime permanent :

- Analyse de sensibilité sur la perméabilité (valeurs testées : 1.10^{-5} , 1.10^{-4} et 1.10^{-3} m/s).
- Analyse de sensibilité sur la recharge (carte initiale + valeurs augmentées de 50 % sur tout le domaine).
- Premiers ajustements du champ de perméabilité et de la recharge visant à améliorer la retranscription de la piézométrie de la nappe alluviale tout en vérifiant la cohérence des différents termes du bilan hydraulique. Exercices pratiques par les étudiants et présentation des résultats.
- Première analyse des débits d'écoulement simulés dans les rivières, confrontation aux rares données de terrain disponibles. Au préalable, une présentation détaillée du mode de calcul opérée par Marthe au niveau des mailles rivière a été nécessaire.
- Remise de la dernière version du modèle (V29092017).

4 – Actions à mener et perspectives

- Finaliser la calibration du modèle en régime permanent pour le 31/10/2017 ;
- Construire un régime transitoire « théorique » pour analyse des fluctuations piézométriques, a priori au pas de temps mensuel (31/10/2017). Compte tenu des données hydro-climatiques disponibles, une calibration en régime transitoire n'est pas envisageable. Par ailleurs, en l'absence de chroniques de débit de rivière et de précipitations journalières, la simulation des débits ne sera pas calibrée, il s'agira uniquement de vérifier la cohérence des débits écoulés.
- Assister à distance les étudiants de l'Université de Port-au Prince :
 - courant octobre : exercices en lien avec la calibration du modèle et l'analyse des résultats de simulation ;
 - courant novembre : simulation de scénarios d'exploitation de la nappe.
- Quatrième et dernière mission du BRGM en Haïti, du 11/12 au 16/12/2017 :
 - validation des scénarios simulés par les étudiants de Port-au-Prince ;
 - remise des certificats de formation aux étudiants et installation de la dernière version du modèle sur les ordinateurs de l'Université de PaP ;
 - présentation du modèle à Cap Haïtien, certificats de formation et installation de la dernière version du modèle sur les ordinateurs de DAI.
- Rédaction du rapport d'étude BRGM, relatif à la construction du modèle et à sa calibration :
 - rapport provisoire pour validation par DAI : fin novembre 2017 ;
 - rapport définitif pour le 18/12/2017.

Pascal Audigane

Responsable d'unité D3E/GDR

Le 04/10/2017 :





Centre scientifique et technique
Direction Eau, Environnement et Ecotechnologies
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr