



ETAT DES LIEUX DU PARC DE FORAGES MOTORISES ET DES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE DE LA REGION DE MATAM

Décembre 2015

Fabien COMMEAUX Chargé de programme eau et assainissement - ADOS

Bertrand PLUS Hydrogéologue expert - ADOS

Abou FALL Directeur - Division Régionale de l'Hydraulique de Matam

Résumé

L'inventaire des forages motorisés de la région de Matam, mené conjointement par la Division Régionale de l'Hydraulique et ADOS entre 2012 et 2015 avait deux objectifs : améliorer et actualiser les informations sur le parc de captages et ses équipements hydrauliques, et faire progresser les connaissances sur les ressources en eau souterraine (seules les eaux souterraines font l'objet de captages publics en région de Matam pour l'alimentation en eau potable et celle des troupeaux).

Le travail d'inventaire

L'ensemble des informations recueillies sur ces ouvrages et leurs équipements, au travers d'enquêtes conjointes de terrain, orientées par les recherches effectuées dans la documentation disponible et complétées autant que possible par des mesures nouvelles (niveaux, débit, qualité), ont été intégrées dans un outil type tableur. Celui-ci rassemble donc, pour chacun des 233 captages inventoriés, l'ensemble des données disponibles à ce jour sur leur localisation, leurs équipements de forage, de pompage, stockage et distribution, leur production et leur suivi par leurs gestionnaires. Il centralise également toutes les données antérieures et celles mesurées dans le cadre de cet inventaire sur les volumes exploités et la qualité de l'eau, et l'incidence de ceux-ci sur les ressources.

Cet outil, avec son jeu de données inédit, est mis à la disposition de l'administration. L'objectif visé à terme est sa pérennisation, sa mise à jour régulière et sa diffusion à l'ensemble des acteurs de l'eau régionaux et nationaux. Ses données pourront parallèlement être intégrées dans le futur outil de gestion partagée envisagé.

L'interprétation statistique de ces données et leur représentation cartographique (13 cartes à l'échelle de la région) constituent l'essentiel de ce rapport. Elles permettent d'obtenir à ce jour une vision synthétique originale du parc régional des captages, ainsi que de l'état actuel des ressources souterraines de la région de Matam, dont sont extraits les quelques éléments majeurs suivants.

Les équipements et les productions

Avec 156 forages exploités, dont 80 % sont concentrés dans une bande d'une trentaine de kilomètres de large longeant le Fleuve Sénégal, la région de Matam rassemble environ 10 % du parc de forages national. A l'exception de la commune de Matam dont les 2 forages sont affermés, l'intégralité du patrimoine régional est soumise au régime de l'hydraulique rurale, géré par l'Etat au travers d'une gestion locale confiée à des Associations des Usagers des Forages (ASUFOR).

Entre les tout premiers forages pastoraux des années 1950 et nos jours, la fréquence des réalisations s'est fortement accrue, avec notamment la mise en œuvre depuis 2005 du Programme d'Eau Potable et d'Assainissement (PEPAM) porté par l'Etat Sénégalais ; la moitié des ouvrages exploités a aujourd'hui moins de 15 ans. A quelques rares exceptions près d'ouvrages équipés d'une pompe thermique, tous sont équipés d'une pompe immergée alimentée par le réseau électrique (39 % des cas), par un groupe électrogène (34 %) ou par une installation solaire (21 %).

Le prix moyen pratiqué au branchement privé est de 278 fcfa/m³, avec une certaine hétérogénéité qui s'explique en partie par le type d'énergie utilisée : le tarif moyen sur les sites électrifiés est de 359 fcfa/m³ contre 223 fcfa/m³ pour les forages solaires.

La production moyenne régionale s'élève à 30 000 m³/j (11 Mm³/an), soit la moitié de la capacité du parc et des équipements actuels. Cet écart s'explique par la forte variabilité saisonnière de la demande en eau ; on estime en effet que la moitié des ouvrages tournent à plein régime au moins quelques jours par an, en fin de saison sèche (quant la majorité des usages - alimentation des populations, abreuvement du bétail, irrigation des cultures - dépend des forages, alors qu'en saison des pluies les troupeaux vont boire dans les mares, ou dans le Fleuve quand il est proche). Les forages

à vocation pastorale, qui représentent les 2/3 du parc, sont donc concernés en premier lieu par cette saisonnalité de la production. L'irrigation concerne 1/3 des ouvrages, mais les volumes en jeu sont généralement limités.

En ajoutant au chiffre précédent les prélèvements estimés des forages privés et des puits, on aboutit à un volume annuel total prélevé de 14 Mm³/an en 2015, soit 2 fois plus qu'en 1980 et 3 fois plus qu'en 1950.

Sur les 69 ouvrages abandonnés recensés, l'arrêt de l'exploitation est consécutif, pour plus de la moitié des cas, à un défaut de production. Ce dernier peut être dû à un vieillissement accéléré du forage ou à une augmentation importante de la demande nécessitant un remplacement de l'ouvrage. Un défaut de conception ou la dégradation du tubage occasionnée par la présence de fer dissous sont aussi des causes d'abandon courantes. Un nombre notable de ces ouvrages abandonnés pourrait être réhabilité pour des usages divers.

La connaissance de la ressource

Comme dans toute la partie nord du pays, la ressource qui concentre le plus de prélèvements est le réservoir profond du Maastrichtien (89 % des forages), qui fournit 82 % du volume produit en 2015 ; les autres ouvrages prélèvent généralement dans 2 nappes de surface : le Continental Terminal (10 % du volume) et l'Eocène (5 %). Malgré des lacunes dans le suivi piézométrique, l'exploitation des données disponibles sur le Maastrichtien met en évidence une évolution des niveaux statiques dans le temps, entre la mise en service des premiers ouvrages et la période actuelle. Cette évolution consiste en une montée modérée (+1 à +3 m) à proximité du Fleuve, d'origine incertaine, et une baisse modérée à notable en direction des terres, qui augmente avec la distance au Fleuve (-2 à -8 m).

Cette baisse, conséquence des prélèvements, est logique compte tenu du caractère fossile du Maastrichtien sur la majeure partie du territoire régional ; si elle n'est pas alarmante à l'heure actuelle en région de Matam, il convient toutefois de la relier à la baisse plus inquiétante mesurée plus à l'ouest et d'en tenir compte dans la programmation des futures réalisations.

La qualité physico-chimique des eaux est généralement bonne, mais aucune information n'est à ce jour disponible sur leur qualité bactériologique. L'analyse des mesures de conductivité dans l'espace fait apparaître des hétérogénéités qu'il conviendrait d'étudier plus en détail : celles-ci pourraient être liées à une stratification de la salinité, en lien avec l'existence d'un biseau salé à la base du réservoir d'eau douce.

A propos du fer, présent naturellement dans le sous-sol de la région, la généralisation des mesures a mis en évidence l'ampleur du phénomène qui touche les 2/3 du parc régional (concentration > 0,3 mg/l) et qui est jugé préoccupant sur la moitié du parc (> 1 mg/l). La zone la plus touchée présente des concentrations supérieures à 5 mg/l, voire 10 mg/l.

La cartographie du fer permet pour la première fois une vision synthétique de sa distribution dans l'espace, même si les investigations menées ne permettent pas aujourd'hui d'apporter d'explications convaincantes à la variabilité extrême des concentrations d'un forage à l'autre.

Les recommandations

Sur la base de cet état des lieux, 14 recommandations sont proposées à destination des pouvoirs publics ; elles concernent l'amélioration des caractéristiques techniques des captages, des pratiques de suivi de l'exploitation et des ressources, ainsi que la pérennisation de cette démarche et son extension éventuelle à d'autres régions.

Table des matières

Listes des figures	9
Liste des tables.....	11
Liste des recommandations	11
Glossaire	12
1. Avant-propos.....	14
1.1. Contexte d'intervention.....	14
1.1.1. Un programme de coopération décentralisée axé sur la gouvernance de l'eau en région de Matam	14
1.1.2. Pourquoi un suivi du parc de forages et de la ressource.....	15
1.1.3. Objectifs visés.....	15
1.2. Présentation de l'étude.....	17
1.2.1. Périmètre de l'étude	17
1.2.2. Méthodologie et déroulement	18
1.2.3. Difficultés rencontrées.....	20
2. Caractéristiques et état des équipements hydrauliques.....	22
2.1. Captage.....	22
2.1.1. Types d'ouvrages et répartition	22
2.1.2. Etat des ouvrages.....	22
2.1.3. Financement des forages.....	23
2.1.4. Âge des ouvrages et réhabilitation.....	23
2.1.5. Profondeur et horizons captés	25
2.1.6. Equipement tubulaire.....	25
2.1.7. Possibilités de mesure et de prélèvement	28
2.1.8. Degré de connaissance des ouvrages.....	29
2.1.9. Historique et causes d'abandon des forages.....	30
2.2. Equipements d'exhaure	32
2.2.1. Energie exploitée	32
2.2.2. Caractéristique des pompes	35
2.2.3. Comptage de production	36
2.2.4. Equipements de secours.....	37
2.3. Ouvrages de stockages et de distribution	39
2.3.1. Types de réseau d'adduction	39
2.3.2. Ouvrages de stockage	39
2.3.3. Ouvrages de distribution.....	41

2.3.4.	Comptage de distribution	41
3.	Usages de l'eau, pratiques d'exploitation et de gestion.....	42
3.1.	Usages de l'eau.....	42
3.1.1.	Alimentation en eau potable.....	42
3.1.2.	Abreuvement du bétail.....	42
3.1.3.	Irrigation de cultures	42
3.2.	Exploitation.....	44
3.2.1.	Volumes produits.....	44
3.2.2.	Potentiel de production et taux d'exploitation des ouvrages	47
3.3.	Gestion	49
3.3.1.	Mise en place des ASUFOR	49
3.3.2.	Tarification de l'eau.....	49
4.	Suivi de la ressource en eau.....	52
4.1.1.	Les aquifères de la région de Matam	52
4.1.2.	Nappe alluviale	54
4.1.3.	Continental Terminal.....	55
4.1.4.	Eocène.....	57
4.1.5.	Paléocène.....	57
4.1.6.	Maastrichtien	58
4.1.7.	Socle.....	60
4.2.	Éléments nouveaux sur les aquifères.....	61
4.2.1.	Attributions stratigraphiques des intervalles captés.....	61
4.2.2.	Continental Terminal.....	61
4.2.3.	Eocène.....	64
4.2.4.	Maastrichtien	66
4.3.	Prélèvements	69
4.3.1.	Prélèvements actuels.....	69
4.3.2.	Reconstitution de l'évolution des prélèvements dans le temps.....	72
4.4.	Piézométrie par aquifère.....	81
4.4.1.	Continental Terminal.....	81
4.4.2.	Eocène.....	82
4.4.3.	Maastrichtien	82
4.5.	Qualité de l'eau par aquifère.....	89
4.5.1.	Eocène.....	89
4.5.2.	Continental terminal.....	89

4.5.3.	Maastrichtien	90
4.6.	Problématique du fer dissous	95
4.6.1.	Rappels sur le fer	95
4.6.2.	Le fer dans les forages de la région de Matam	98
5.	Conclusion et recommandations	111
5.1.	Conclusions et recommandations sur l'inventaire lui-même.....	111
5.1.1.	Périmètre de l'étude	111
5.1.2.	Caractéristiques et état des équipements.....	111
5.1.3.	Usages de l'eau, pratiques d'exploitation et de gestion	116
5.2.	Conclusions et recommandations sur la gestion des ressources en eau souterraines.....	117
5.2.1.	Rappels sur les aquifères	117
5.2.2.	Eléments nouveaux apportés par l'inventaire.....	117
5.2.3.	Prélèvements	117
5.2.4.	Piézométrie	120
5.2.5.	Qualité des eaux.....	122
5.2.6.	Fer	123
5.2.7.	Elargissement de l'inventaire et insertion dans un outil de gestion des données.....	125
5.2.8.	Nécessité de la révision d'un dogme.....	127
5.2.9.	Conclusion sur les apports espérés de cet inventaire	128

Listes des figures

Liste des graphiques

Localisation schématique des différentes zones éco-géographique de Matam	22
Etat des forages	22
Financeurs principaux des ouvrages	23
Nombre de forages réalisés et réhabilités en région de Matam	23
Mesures de niveau piézométrique	28
Point de prélèvement d'eau	28
Niveau de connaissance des ouvrages	29
Causes d'abandons de forages	30
Energie utilisée pour l'exhaure	32
Date d'installation des équipements en service	35
Puissance des pompes installées en fonction de l'énergie	36
Débits des pompes installées en fonction de l'énergie (sauf solaire)	36
Débit des installations solaires	36
Compteurs de production	37
Equipements de secours	37
Taille des systèmes AEP	39
Volume des réservoirs sur tour	39
Volume des réservoirs au sol	40
Ouvrages de distribution	41
Usages de l'eau	42
Méthodologie suivie pour l'approche des volumes produits	44
Taux d'exploitation moyen des ouvrages	47
Taux d'exploitation des ouvrages en pointe	47
Gérance des forages	49
Prix de vente moyen de l'eau en fonction de l'énergie d'exhaure	50
Unité aquifère du Sénégal	53
Coupe hydrogéologique simplifiée de Vélingara à Matam	53
Profondeur et niveaux des crépines des ouvrages captant le Maastrichtien	67
Distribution des débits dans le Maastrichtien	68
Ventilation des besoins en eau sur quelques Communes	70
Reconstitution de l'historique des prélèvements des eaux souterraines en région de Matam	78
Essai de reconstitution d'un historique de prélèvements par aquifère	79
Evolution des niveaux statiques dans le CT	82
Dates des mesures de niveau statique	83
Evolution des niveaux statiques depuis l'origine des mesures	84
Baisse reconstituée des niveaux statiques	87

Température en fonction de la profondeur dans le Maastrichtien	90
Conductivité en fonction de la profondeur dans le Maastrichtien	92
Evolution de la conductivité dans le temps dans le Maastrichtien	94
Point de prélèvement d'eau	98
Comparaison de mesures de fer en fonction du point de prélèvement	99
Concentration en fer au forage Ourosogui F3	100
Incidence du transit dans le réservoir et le réseau sur la concentration en fer	100
Evolution des concentrations en fer en cours de pompage	102
Présence de fer dissous	103
Concentration en fer dissous en sortie de forage en fonction du niveau capté	108
Corrélation entre la conductivité électrique et la concentration en fer	109

Liste des photographies

Pompe à axe vertical - Younouféré	35
Réservoir au sol - Lougré Thioly	40
Petit réservoir surélevé - Wali Diala	40
Eléments de pompes immergées - Kanel	97
Château d'eau - Sinthiou Garba	97
Colonne de refoulement - Seno Palel	97

Liste des cartographies

Périmètre de l'inventaire des forages exploités et non-exploités de la région de Matam	21
Chronologie de la réalisation des forages en région de Matam	24
Profondeur totale des forages de la région de Matam	27
Energie utilisée dans les forages de la région de Matam	34
Usages de l'eau des forages de la région de Matam	43
Production moyenne journalière des forages de la région de Matam	45
Taux moyen d'exploitation des forages de la région de Matam	48
Prix de l'eau pratiqués au niveau des forages de la région de Matam	51
Résultats de l'inventaire relatifs à l'aquifère Continental Terminal	63
Résultats de l'inventaire relatifs à l'aquifère Eocène	65
Evolution des niveaux statiques mesurée dans le Maastrichtien	86
Conductivités mesurées dans le Maastrichtien	91
Fer dissous dans les forages de la région de Matam	105

Liste des tables

Hydrogéologie de la nappe alluviale	54
Résidus secs mesurés dans le Maastrichtien au forage de Taïba	58
Débit spécifique et transmissivité dans le Ferlo	59
Caractéristiques principales des ouvrages attribués au Continental Terminal	62
Caractéristiques principales des ouvrages attribués à l'Eocène	64
Évaluation des besoins en eau par commune et par usage	72
Estimation des prélèvements dans le Maastrichtien dans les années 1950	73
Estimation des prélèvements dans les forages motorisés de la région de Matam dans les années 1975	73
Population, cheptel, nombre de forages et estimation des prélèvements correspondants en 1984	74
Estimation des prélèvements par aquifère entre 1998 et 2007	74
Tentative d'évaluation des prélèvements par puits entre 1950 et 2015	75
Données de population et de production des communes urbaines	76
Reconstitution de l'historique des prélèvements totaux en région de Matam	77
Tentative de ventilation des prélèvements par aquifère en 2015	78
Exemple de contrastes de conductivité à l'échelle locale	93
Mesures de fer et turbidité à Sinthiou Garba	101
Mesures de fer à Matam	106
Mesures anciennes de conductivité et de fer (ante-1967)	110

Liste des recommandations

1 Référentiel commun de numérotation des captages	112
2 Rapports de fin de travaux	112
3 Programme de réfection des têtes des forages abandonnés	112
4 Spécifications techniques d'équipement des ouvrages neufs	114
5 Sécuriser l'usage domestique sur les points d'eau pastoraux	115
6 Améliorer le suivi de l'exploitation par les ASUFOR et par la BPF	116
7 Améliorer la connaissance des prélèvements dans les puits et préciser la vocation des "nappes phréatiques"	119
8 Tracé de cartes piézométriques	121
9 Révision du réseau piézométrique et des procédures de dépouillement des données, prise en compte des données anciennes	121
10 Nécessité d'un suivi qualitatif renforcé et d'une recherche sur la situation du front eau douce-eau salée en profondeur	123
11 Amélioration de la connaissance de la problématique du fer	124
12 Mise en œuvre de mesures simples de limitation des impacts du fer sur les équipements	125
13 Outil de capitalisation et de gestion des données	126
14 Diffusion, partage et exploitation des principaux résultats de ce travail	128

ACRA : ONG italienne

ADOS : Ardèche Drôme Ourosogui Sénégal - ONG franco-sénégalaise

AEMV : Alimentation en Eau Multi-Village

AEP : Alimentation en Eau Potable

AEV : Alimentation en Eau Villageoise

ALDA : Association de Liaison pour le Développement d'Agnam

ANSD : Agence Nationale de Statistique et de la Démographie

ASUFOR : Association d'Usagers de Forages

BAD : Banque Africaine de Développement

BADEA : Banque Arabe pour le Développement Economique

BCI : Budget Consolidé d'Investissement

BOAD : Banque Ouest-Africaine de Développement

BPF : Brigade des Puits et Forages

BRGM : Bureau de Recherche Géologique et Minière - Etablissement public français

CE : Château d'Eau

CEAO : Communauté des Etats d'Afrique de l'Ouest

CFPO : Centre de Formation Professionnelle d'Ourosogui

CIEH : Chartered Institute of Environmental Health

CILSS : Comité permanent Inter-Etats de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel

CR : Communauté Rurale (devenue Commune avec l'Act 3 de la décentralisation)

CT : Continental Terminal

FAO : Food and Agriculture Organization - Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

DE : Direction de l'Elevage

DEH : Direction des Etudes Hydrauliques

DEM : Direction des équipements et de la Maintenance (remplacée par l'OFOR en 2014)

DGPRE : Direction de la Gestion et de la Planification de la Ressource en Eau

DH : Direction de l'Hydraulique

DIEPA : Décennie de l'eau potable et de l'assainissement, 1980-1990

DRH : Division Régionale de l'Hydraulique

FED : Fonds Européen de Développement

FKDEA : Fonds Koweïtien pour le Développement Economique Arabe

GPF : Groupement de Promotion Féminine

IRH : Inventaire des Ressources Hydrauliques

JECFA : Joint Expert Committee for Food Additives - Comité d'experts FAO/OMS sur les additifs alimentaires

JICA : Agence Japonaise de Coopération Internationale

ND : Niveau Dynamique

NGS : National Geodetic Survey

NS : Niveau Statique

OFOR : Office des Forages Ruraux

OIG : Organisation Intergouvernementale

OMD : Objectifs Du Millénaire

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

OMVS : Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal

ONG : Organisation Non-Gouvernementale

PAISD : Programme d'Appui aux Initiatives de Solidarité pour le Développement

PAV : Pompe à Axe Vertical

PEPAM : Programme d'Eau Potable et d'Assainissement du Millénaire

PEPAM-IDA : Sous-programme du PEPAM financé par l'Association Internationale de Développement (Fonds de la Banque Mondiale)

PHR : Programme d'Hydraulique Régional (de Matam, 2010-2015)

PLD : Plan Local de Développement

PLHA : Plan Local d'Hydraulique et d'Assainissement

PMH : Pompe à Motricité Humaine

PROGRES : Programme de Gestion des Ressources en Eau Souterraines

PRSII : Programme Régional Solaire Phase II - 2001-2010

REGEFOR : Réforme de la Gestion des Forages Ruraux motorisés

RS : Résidu Sec

SDE : Sénégalaise des Eaux

SENELEC : Société National d'Électricité du Sénégal

SIG : Système d'Information Géographique

SOMH : Subdivision d'Outillage Mécanique de l'Hydraulique - remplacée par la DEM en 1983

SONES : Société Nationale des Eaux du Sénégal

SRSD : Services Régionaux de la Statistique et de la Démographie

TPC : Tube Porte Crépine

UBT : Unité Bétail Tropical

UE : Union Européenne

UEMOA : Union Economique et Monétaire Ouest-Africaine

UNICEF : Fonds des Nations Unies pour l'enfance

USAID : United States Agency for International Development - Agence des États-Unis pour le développement international

1. Avant-propos

1.1. Contexte d'intervention

1.1.1. Un programme de coopération décentralisée axé sur la gouvernance de l'eau en région de Matam

L'association ADOS a été créée en 1985 pour agir en région de Matam (Nord-Est du Sénégal), en soutien aux dynamiques de développement des populations. L'évolution du contexte institutionnel sénégalais a notamment été marquée par le renforcement de la décentralisation en 1996, puis par la création en 2002 de la Région de Matam. Cela a favorisé l'action des collectivités territoriales rhônalpines (France) dans cette région, avec la mise en place des partenariats de coopération décentralisée. Ces partenariats ont eu pour objectif le développement des capacités de maîtrise d'ouvrage des collectivités sénégalaises, avec l'appui de proximité d'ADOS en qualité d'opérateur des collectivités françaises et sénégalaises.

C'est dans ce contexte qu'a été initié en 2010 un important programme de coopération décentralisée axé sur l'hydraulique rurale et en co-maîtrise d'ouvrage française (Départements Drôme et Ardèche, et Région Rhône-Alpes) et sénégalaise (ex-Communautés rurales et Communes des départements de Kanel et Matam puis de Ranérou, et Région de Matam). Le programme est soutenu depuis 2010 par le Ministère français des Affaires Etrangères, de l'Agence de l'Eau Rhône Alpes Méditerranée Corse et l'Etat sénégalais.

La finalité du programme est d'améliorer la gouvernance dans le secteur de l'hydraulique et de l'assainissement, en renforçant les capacités de maîtrise d'ouvrage des acteurs du secteur, pour une gestion durable du service de l'eau. De manière transversale, la conception et la mise en œuvre du programme s'est appuyé sur un partenariat fort avec l'Etat du Sénégal et les différentes directions nationales. Des conventions cadre ont été mises en place, notamment avec le Ministère de l'Hydraulique et l'Unité de Coordination du PEPAM. Le programme, dans ses deux phases (2010-2012 ; 2013-2015) a permis la mise en œuvre d'un large spectre d'actions complémentaires poursuivant cet objectif global, et notamment :

- la réalisation de systèmes d'alimentation en eau potable, principalement dans les zones reculées du Ferlo, et la mise en place d'unités pastorales pour une gestion durable et rationnelle de la ressource
- la réalisation d'ouvrages d'assainissement publics et privés
- l'accompagnement du Centre de Formation Professionnel d'Ourossogui (CFPO) pour la mise en place d'une filière de formation initiale au métier de plombier canalisateur
- la formation et l'accompagnement d'artisans locaux dans les secteurs de la maintenance hydraulique et la canalisation
- le recyclage et la formation continue des conducteurs de forages
- l'accompagnement d'Associations d'Usagers de Forages (ASUFOR)
- la création d'un fond de garantie pour soutenir l'activité économique dans le secteur de l'eau
- l'accompagnement de la Division Régionale de l'Hydraulique pour la mise en place d'un suivi du parc de forages et de la ressource en eau souterraine

Le présent document concerne spécifiquement ce dernier volet.

1.1.2. Pourquoi un suivi du parc de forages et de la ressource

L'accompagnement de la Division Régionale de l'Hydraulique (DRH) pour la mise en place d'un suivi du parc de forages et de la ressource en eau souterraine s'est imposé dès la première phase du programme, suite à plusieurs constats :

- La connaissance des ouvrages de captages était très parcellaire et souvent disséminée entre différents intervenants du secteur :
 - les ASUFOR en charge de l'exploitation des ouvrages
 - la Division Régionale de l'Hydraulique (DRH) en charge de leur maintenance
 - la Direction de la Gestion et Planification de la Ressource en Eau (DGPRE) du Ministère de l'Hydraulique et de l'Assainissement à Dakar, en charge de l'instruction des autorisations de forage, du suivi ressources souterraines et de la planification

Les agents de la DRH ne disposaient donc que rarement de tous les éléments nécessaires à la bonne connaissance des ouvrages dont ils doivent assurer la maintenance. Cela conduisait régulièrement à des demandes d'information transmises à Dakar, induisant des pertes de temps et des lenteurs dans leur action au quotidien.

- Un certain nombre d'ouvrages était très peu connu, les documents de référence n'ayant parfois jamais été transmis à l'administration.
- Les informations disponibles étaient souvent recopiées de documents anciens, répétant parfois des erreurs antérieures, en particulier à cause de confusions entre ouvrages, du fait de la non-systématisation d'un système de référence unique, en l'occurrence la numérotation IRH.
- Les seules mesures disponibles pour caractériser les ouvrages (niveaux, débit, qualité) étaient des mesures anciennes (rapports de réception), très peu de mesures récentes ayant été effectuées depuis.
- Enfin, bon nombre de sites d'exhaure présentaient des dépôts rougeâtres, entraînant parfois un vieillissement prématuré des équipements hydraulique, laissant présager un problème de fer dissous assez généralisé. Parallèlement les analyses disponibles faisaient souvent apparaître des teneurs en fer très faibles voire nulles (vraisemblablement à cause de protocoles défaillants pour la conservation des échantillons avant dosage en laboratoire).

L'amélioration de la connaissance du parc de forage et des ressources en eau souterraines a donc été identifiée comme un préalable à l'amélioration du service de l'eau en région de Matam.

1.1.3. Objectifs visés

La mise en place d'un suivi du parc de forages et de la ressource en eau souterraine vise plusieurs objectifs :

- la réalisation de campagnes de visite des ouvrages systématiques et la production de données fiables et récentes sur les forages, leurs principales caractéristiques techniques actuelles (niveaux, débit et volumes produits, qualité, pratiques d'exploitation, etc.) et sur les aquifères captés.
- Le recueil des données techniques sur les forages et sur le suivi des ressources actuel, archivées principalement au niveau des directions du Ministère de l'hydraulique et de l'assainissement à Dakar.
- la création d'un outil de bancarisation de ces données préexistantes et/ou nouvelles et d'aide à la décision pour l'optimisation de la gestion du parc de forages par les agents de la DRH.

- la réalisation de ce document de synthèse, présentant l'état des lieux du parc de forages et celui des ressources en eau souterraine
- la diffusion et le partage de l'information auprès de tous les acteurs de l'eau régionaux et centraux.

1.2. Présentation de l'étude

1.2.1. Périmètre de l'étude

Compte tenu des objectifs visés, un important travail de production et de bancarisation de données à nécessairement été réalisé, et ce afin de rendre disponible, dans un seul outil, la quasi-totalité des données existantes pour chaque ouvrage.

Pour cela, 4 sources principales de données ont été identifiées et exploitées :

- Les enquêtes de terrain sur les ouvrages ont été systématiquement réalisées, en binôme avec un agent de la DRH et ADOS, afin de rencontrer à minima un représentant du bureau de l'ASUFOR et le conducteur de forage. Elles ont permis de collecter les données de base sur l'identification de l'ouvrage (notamment coordonnées GPS, années de réalisation) mais aussi toutes les informations utiles sur les équipements de stockage et de distribution, les pratiques d'exploitation et de gestion de l'ouvrage, etc.
- En complément de l'enquête, quelques mesures simples ont été généralisées in situ, quand la configuration des sites le permettait : niveau statique/dynamique, mesure de débit, physico-chimie et teneur en fer dissous.
Afin d'être le plus exhaustif possible, l'objectif visé était que tout ouvrage exploité soit visité au moins une fois durant les campagnes d'inventaire. En pratique, 95 % des ouvrages existants ont réellement pu l'être. Les forages abandonnés ont aussi été inventoriés, notamment pour connaître les causes d'abandon et procéder à une mesure de niveau statique. 60 % d'entre eux ont pu être visités.
- Le suivi des équipements d'exhaure existant (caractéristiques des pompes et des groupes électrogènes) réalisé par la DRH, déjà très complet et bien suivi.
- Le fond bibliographique de la DGPRE a permis de retrouver un certain nombre de rapports de forage et de rapports de réhabilitation comprenant notamment des coupes techniques et des essais de pompages utiles. Les données des campagnes piézométriques réalisées périodiquement par la DGPRE sur son parc de piézomètres ont aussi été recueillies et intégrées.

A noter que les travaux se sont concentrés sur les ouvrages de captage souterrain motorisés de toute la région de Matam, exploités au moins partiellement pour l'alimentation en eau potable des populations. Cela comprend une très grande majorité de forages mais aussi quelques puits. Les deux seuls forages actuellement en affermage (SDE à Matam) ont aussi été inclus.

Cet état des lieux ne prend donc pas en compte :

- les ouvrages équipés de pompe à motricité humaine (puisage et pompe manuelle)
- les ouvrages non-utilisés, même partiellement, pour l'alimentation en eau potable de population (forages à usage agricole exclusif par exemple)
- les ouvrages privés (à 3 forages près, pour affiner les connaissances sur des contextes particuliers)
- les ouvrages de captage d'eau de surface

1.2.2. Méthodologie et déroulement

1.2.2.1. Recensement des ouvrages

En préalable aux campagnes de terrain, un travail de recensement des ouvrages a été mené. Deux sources principales de données ont été exploitées pour obtenir une liste la plus exhaustive possible des ouvrages de la région :

- Le suivi des équipements hydrauliques tenu par la DRH sur les ouvrages dont elle assure la maintenance. Cette liste est exhaustive mais ne concerne que les ouvrages en cours d'exploitation.
- La base de données PROGRES, administrée par la DGPRES et accessible uniquement à Dakar, qui comprend tous les ouvrages dont le rapport de création a bien été transmis au niveau central. Cette liste n'est donc malheureusement pas exhaustive mais a permis de recenser bon nombre d'ouvrages anciens, aujourd'hui abandonnés.

Le recoupement et l'exploitation de ces deux sources de données ont permis d'obtenir une première liste d'ouvrages de la région, localisés plus ou moins précisément, sur la base de laquelle ont pu être organisées les campagnes de terrain.

Chaque sortie sur le terrain a ensuite permis d'affiner cette liste, de retrouver souvent d'anciens ouvrages non répertoriés, et de corriger la typologie des ouvrages numérotés chronologiquement sur les sites où il en existe plusieurs.

Enfin, des compléments (sur l'équipement des forages, les mesures anciennes de niveau et de qualité de l'eau) ont été recherchés dans des documents anciens : répertoires des forages des années 1980, anciennes et études hydrogéologiques.

1.2.2.2. Campagnes de terrain

Le recensement des ouvrages, par le recoupement de diverses listes préexistantes complété par le travail de terrain, a permis d'établir une liste finale de 158 forages exploités et 77 non-exploités connus. Les ouvrages exploités ont logiquement fait l'objet de plus d'attention. Réalisées entre fin 2012 et début 2015, les campagnes de terrain ont alors permis d'avoir une bonne connaissance de la situation concernant 151 d'entre eux. Parmi les forages non exploités on dénombre :

- des forages abandonnés pour les 3/4, dont les équipements hydrauliques ont été retirés. Ces derniers ont été visités dans la mesure du possible, mais certains ont dû être laissés de côté, étant situés dans des zones très reculées et sans garantie de retrouver l'ouvrage sur place ni de pouvoir y récolter des informations.
- quelques rares forages non-exploités mais gardés en secours, et parfois toujours équipés.
- des forages nouvellement créés ou en cours de travaux, dont les équipements ne sont actuellement pas encore réceptionnés et qui devront être visités plus tard.

La première campagne de terrain a été menée en novembre 2012 sur 25 ouvrages, avec pour objectif principal de visiter un panel de forages et puits représentatifs de l'ensemble du parc régional, en terme de typologie d'ouvrage. A cette période, la présence de fer était connue de la DRH qui en observait régulièrement les impacts sur les équipements de certains systèmes AEP, mais il n'existait que très peu d'analyses fiables pour l'étayer. Cette première campagne intégrait donc des mesures systématiques pour aboutir à une première idée de l'étendue de cette problématique.

Par la suite, une deuxième campagne s'est tenue entre mars et avril 2013 concernant 30 nouveaux ouvrages. Elle aura permis de préciser l'ampleur du problème lié au fer, et surtout de mettre en évidence l'impact des conditions de prélèvement et d'exploitation sur la teneur en fer mesurée.

Une troisième campagne de 34 ouvrages a été réalisée entre novembre et décembre 2013, suite à laquelle un personnel d'ADOS a été mis à disposition de la DRH pour la finalisation de ce travail de terrain.

Enfin, la centaine d'ouvrages restants a été visitée tout au long de l'année 2014, et 2015 pour un petit nombre d'entre eux. Certains sites inventoriés lors des 3 premières campagnes ont aussi été revisités principalement dans un souci d'homogénéisation des mesures de fer (cf. Annexe 1 | Caractéristiques principales des ouvrages visités).

1.2.2.3. Base de données (provisoire)

Dans la mesure où aucune base de données préexistante ne couvrait tous les besoins pré-identifiés en amont de l'inventaire (cf. 5.2.7), le choix a été fait de centraliser l'ensemble des données recueillies et produites dans un nouvel outil simple, type tableur, permettant la saisie, le stockage et l'exploitation des données dans l'attente de leur intégration dans un futur outil plus abouti. Cet outil provisoire est organisé autour de 6 rubriques pour la saisie des données (cf. Annexe 2 | Liste des champs pris en compte dans la base de données provisoire) :

- Rubrique « Identification » (22 champs) : pour chaque ouvrage recensé, noms et numéros d'identification (dont n°IRH), localisation (village et rattachement administratif), coordonnées géographiques, date d'inventaire et participants
- Rubrique « Forage » (48 champs) : date et programme de réalisation, description technique détaillée du génie civil (tête de puits, tubages, crépines)
- Rubrique « Equipements » (27 champs) : ensemble des données concernant les équipements d'exhaure (historique des pompes installées, types et caractéristiques du matériel en place, énergie, débit et HMT), compteurs de production
- Rubrique « Exploitation » (26 champs) : usages de l'eau, ouvrages de stockage et de distribution (réseau eau domestique, distribution bétail, irrigation), débits exploités, durées et volumes pompés moyens journaliers
- Rubrique « Gestion » (21 champs) : maintenance, noms et coordonnées des responsables de la gestion (comité ou ASUFOR), tarification de l'eau, équipements de secours, qualité du suivi et de la maintenance
- Rubrique « Mesures » (91 champs) : ensemble des mesures disponibles, réalisées lors de l'inventaire et mesures antérieures (niveaux statiques et dynamiques, débits, qualité des eaux)

Une fois un ouvrage renseigné, cet outil permet l'édition d'une « fiche forage » qui rassemble sur 4 pages les informations existantes, agrémentées de graphiques présentant l'évolution des niveaux et de la qualité de l'eau dans le temps, ainsi que de photos légendées (cf. Annexe 3 | Exemple de fiche forage).

A l'échelle du parc, l'outil offre la possibilité d'effectuer des statistiques et de tracer des graphiques sur une vingtaine de variables. Il permet également l'export de tables utilisées comme données d'entrée d'un SIG pour l'exploitation géographique, les requêtes spatiales et l'édition de cartographies thématiques. A l'heure actuelle, cet outil est déployé à la DRH de Matam et des copies sont régulièrement transmises aux directions nationales concernées. Des recommandations sur son utilisation seront formulées au chapitre 5.

1.2.2.4. Implications des différents services

Les campagnes de terrain ont mobilisé l'ensemble des ASUFOR et leurs conducteurs de forage qui ont fourni des informations sur les pratiques d'exploitation et de gestion. Sur 13 sites pour lesquels il n'y a encore pas d'ASUFOR, l'enquête a été réalisée auprès du comité de gestion en place, et auprès de la SDE pour les deux forages de la Commune affermée de Matam.

Au niveau central, la DGPRE a été impliquée en partageant les données dont elle dispose dans sa base PROGRES, et en mettant à disposition l'ensemble des documents papier existant sur les forages de la région.

Tout au long de ce travail, des réunions de restitution du travail d'inventaire et d'échange ont été organisées auprès de la DGPRE mais aussi des autres directions du Ministère de l'Hydraulique et de l'Assainissement (DH, ancienne DEM et plus récemment OFOR), ainsi qu'à l'unité de coordination du PEPAM qui a toujours suivi de près le déroulement de ce volet des programmes hydrauliques.

L'ensemble des travaux a été réalisé en binôme avec la DRH, avec le soutien logistique et technique d'ADOS.

1.2.2.5. Moyens matériels et humains

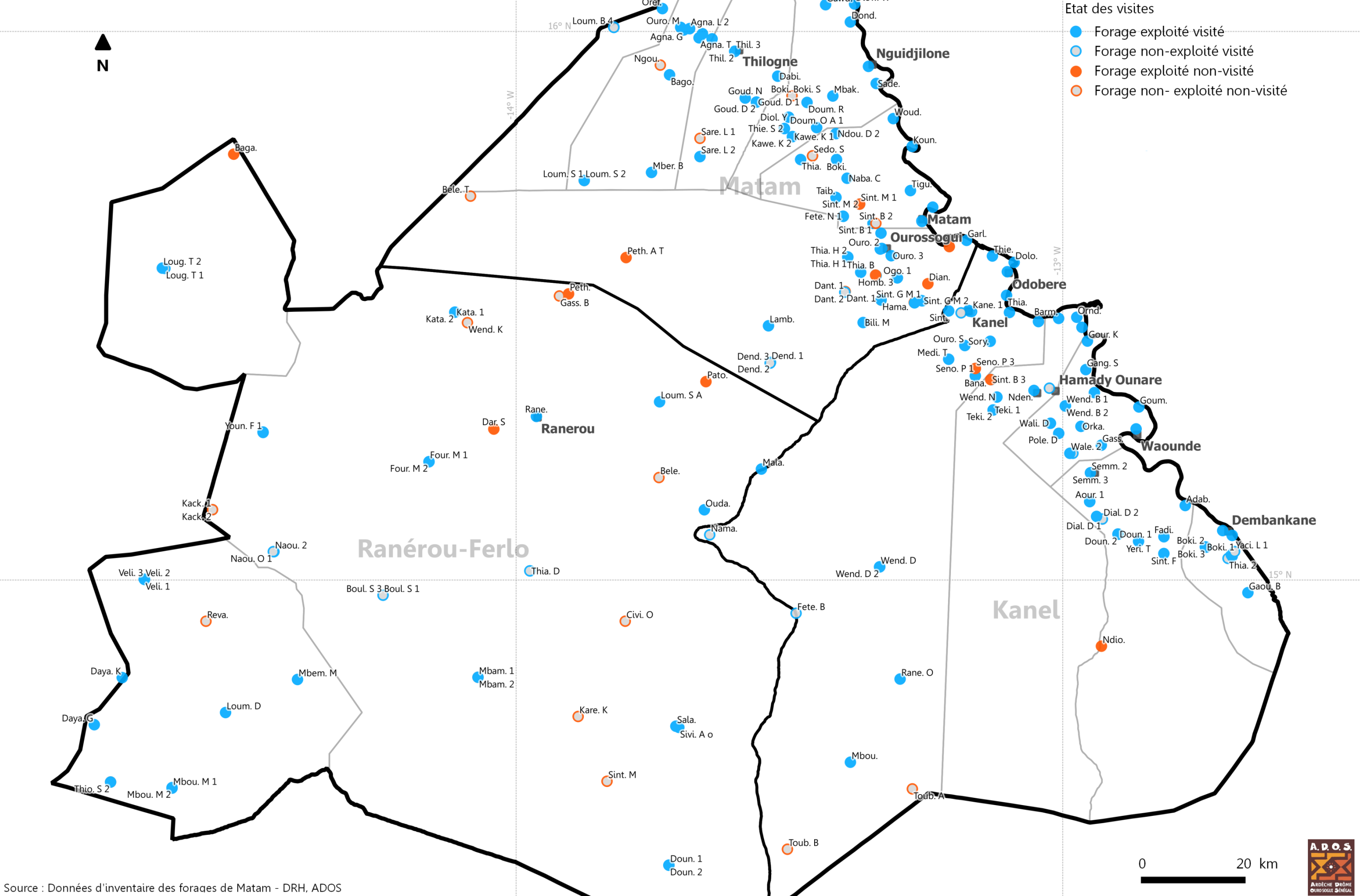
Tous les agents fonctionnaires et contractuels de la DRH ont été impliqués dans l'organisation et la réalisation des campagnes de terrain et dans l'exploitation des données produites, et plus particulièrement le Chef de la Division régionale et le Chef de la Brigade des Puits et Forages.

En accompagnement, ADOS a initialement déployé un stagiaire appuyé par un ingénieur hydraulicien de l'équipe en place, avant de recruter un ingénieur spécifiquement mis à disposition de la DRH sur une durée de 2 ans, aidé d'un hydrogéologue expert mobilisé sur des missions de terrain ponctuelles et en supervision, et enfin d'un chauffeur pour la quasi-totalité des journées de terrain. Les moyens logistiques employés ont principalement été fournis par ADOS, qui a mis à disposition un véhicule ainsi que le matériel de terrain nécessaire (sonde piézométrique, conductimètre, spectrophotomètre pour le dosage du fer, GPS).

1.2.3. Difficultés rencontrées

Le principal obstacle au déroulement de ce travail a été de composer avec la disponibilité de chacune des parties prenantes. Au lancement, un engagement de la DEM à déployer un personnel attitré en région de Matam avait été pris, qui aurait été accompagné par ADOS pour mener à bien le travail d'inventaire. Cet engagement n'a finalement pu être tenu. La DRH de Matam ne comptant que 3 fonctionnaires (dont un administratif), il a alors été difficile de mobiliser son personnel sur la durée. La difficulté principale a été de programmer chaque journée de terrain avec l'un d'eux, en interférant le moins possible avec ses autres missions. Dans un souci d'optimisation des déplacements, notamment pour les sites moins accessibles, certaines journées d'inventaires ont été réalisées conjointement à des missions de maintenance, ou encore d'implantation/réception de travaux. Pour environ 20 % des visites d'ouvrages, la DRH n'a pas pu être représentée par un personnel technique et dans 25 % des cas elle l'a été par un personnel contractuel ou un bénévole.

Périmètre de l'inventaire des forages exploités et non-exploités de la région de Matam



2. Caractéristiques et état des équipements hydrauliques

2.1. Captage

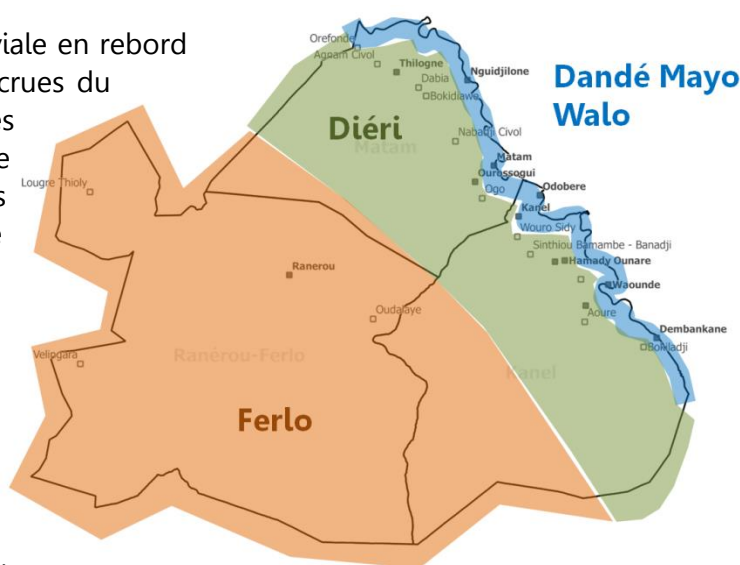
2.1.1. Types d'ouvrages et répartition

Jusqu'en 2015, la totalité des captages motorisés dédiés à la production d'eau potable prélevait des eaux souterraines. Le Fleuve Sénégal, seul cours d'eau permanent de la région, n'est actuellement plus exploité de façon motorisée, mais une première unité de potabilisation d'eau de surface est en cours de construction (Diéla).

La quasi-totalité de ces prélèvements souterrains se fait au moyen de forages. Le parc ne compte que deux puits actuellement équipés de pompes immergées (Agnam Lidoubé)¹.

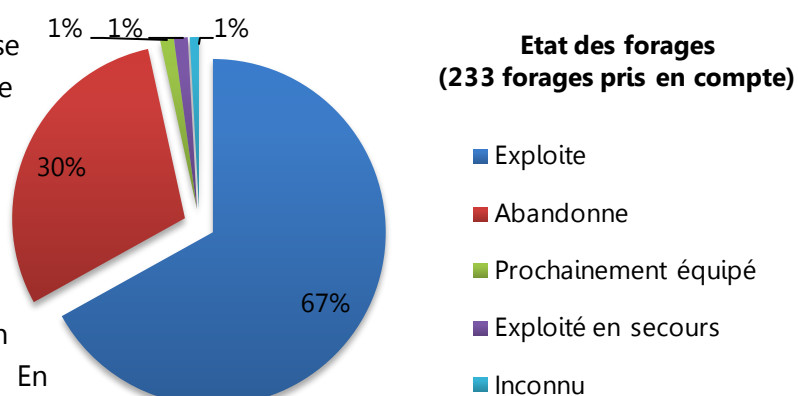
En région de Matam, la population est principalement concentrée dans une bande d'une trentaine de kilomètres de large délimitée par le Fleuve, et traversée par l'axe goudronné (et électrifié) de la RN2.

- La zone du Dandé Mayo, levée alluviale en rebord des berges, non inondable par les crues du Fleuve, regroupe 30 % des ouvrages actuellement exploités. En revanche la zone du Walo, ensemble des terres basses inondables ne comprend pas de villages proprement dits et donc pas de captages, du fait de ce caractère inondable.
- En direction des terres, et sur une trentaine de kilomètres se trouve la zone du Diéri qui concentre à elle seule environ 50 % des captages.
- Au-delà commence la grande zone pastorale du Ferlo, dans laquelle se dispersent quelques 20 % des ouvrages de la région régionale.



2.1.2. Etat des ouvrages

Le recensement des ouvrages, sur la base des bases de données existantes, de précédents recensements partiels, des connaissances des agents de terrain et évidemment des campagnes d'inventaire a abouti à une liste de 233 ouvrages. Parmi eux, les 2/3 sont en cours d'exploitation. Cette proportion reste pourtant un ordre de grandeur. En effet les ouvrages abandonnés ne faisant l'objet



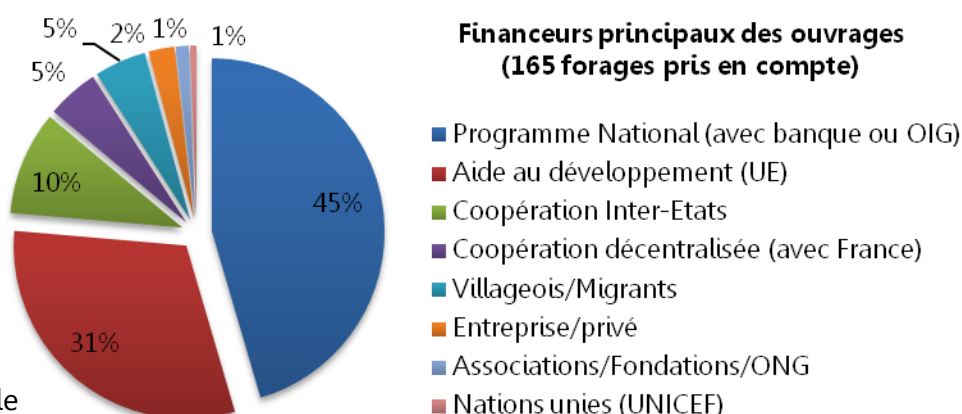
¹ Par abus de langage, le terme de « forage » pour désigner les captages souterrains sera utilisé dans ce document, mais cette étude intègre bien les deux puits d'Agnam Lidoubé, étant motorisé et au moins partiellement destinés à la consommation humaine, ainsi qu'un puits privé à Sinthiou Garba

d'aucune documentation sont fréquents, et nombre d'entre eux n'ont pu être retrouvés qu'une fois sur le terrain. L'ensemble de la région n'ayant pas pu être totalement « parcourue », il est probable que ce recensement soit passé à côté de certains d'entre eux.

2.1.3. Financement des forages

La réalisation d'un forage fait souvent intervenir plusieurs acteurs avec un montage financier parfois complexe. On retiendra qu'une petite moitié du parc régional (45 %) a vu le jour grâce à différents programmes de l'Etat sénégalais d'accès à l'eau (généralement le BCI et le PEPAM après 2005), souvent appuyé

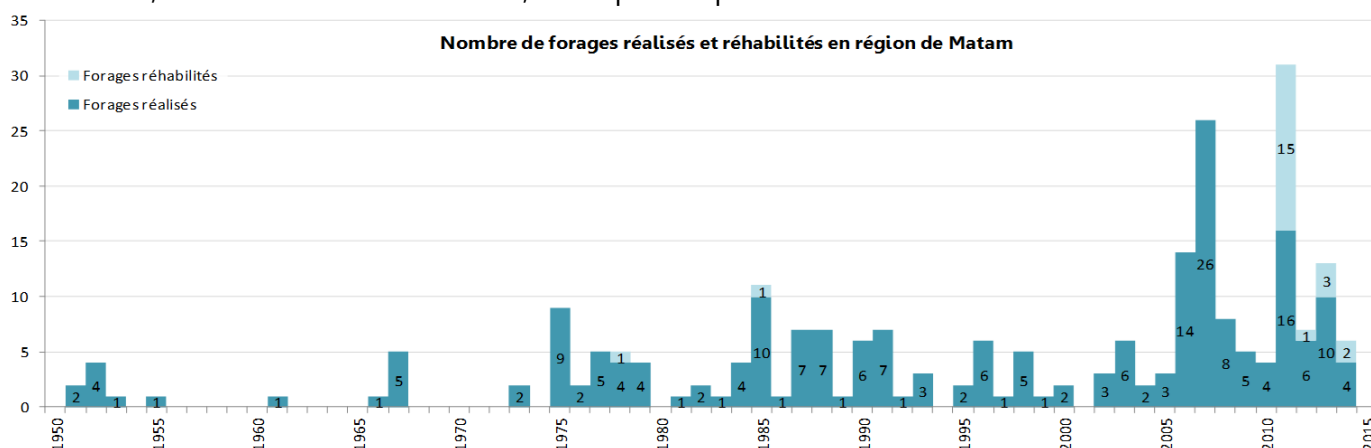
par une banque internationale de développement (Banque Mondiale, BADEA, BOAD) ou une organisation intergouvernementale de la sous-région (CEAO, UEMOA). L'union Européenne (FED, CILSS) est aussi un des financeurs principaux à l'échelle du parc régional (31 %). Viennent ensuite les aides au développement de pays extérieurs à l'Afrique et les coopérations inter-états (Japon, France, Chine, Suisse) puis les programmes de coopération décentralisée française (Rhône-Alpes, Drôme, Ardèche, Yvelines). Enfin quelques ouvrages ont parfois été financés par les bénéficiaires eux-mêmes, souvent via une association villageoise regroupant des résidents et des expatriés (ALDA) et d'autres ont pu l'être par des entreprises privées dont l'activité a nécessité un point d'eau le temps d'une activité temporaire (réalisation de voirie) avant une rétrocession à l'Etat.



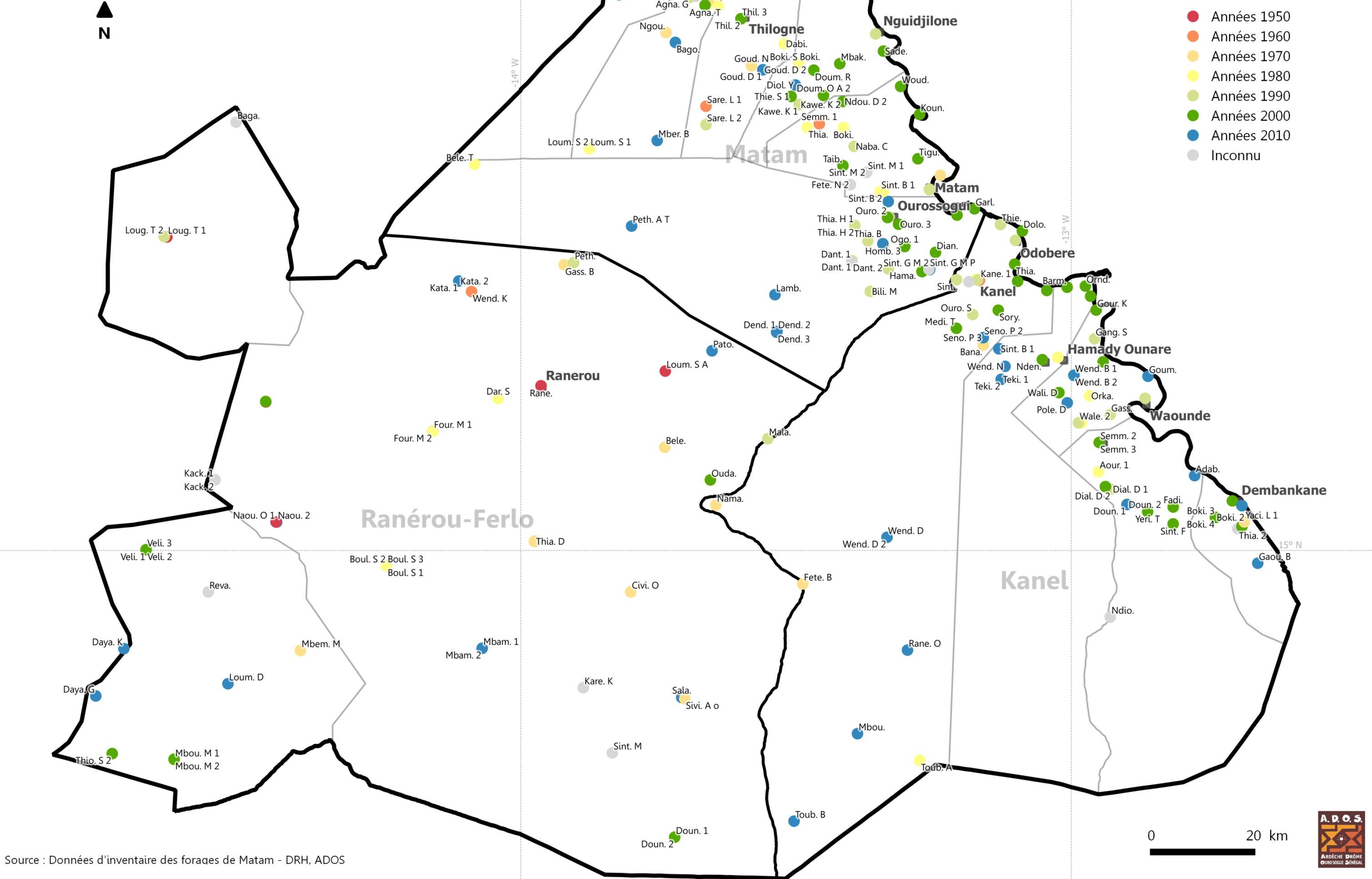
par une banque internationale de développement (Banque Mondiale, BADEA, BOAD) ou une organisation intergouvernementale de la sous-région (CEAO, UEMOA). L'union Européenne (FED, CILSS) est aussi un des financeurs principaux à l'échelle du parc régional (31 %). Viennent ensuite les aides au développement de pays extérieurs à l'Afrique et les coopérations inter-états (Japon, France, Chine, Suisse) puis les programmes de coopération décentralisée française (Rhône-Alpes, Drôme, Ardèche, Yvelines). Enfin quelques ouvrages ont parfois été financés par les bénéficiaires eux-mêmes, souvent via une association villageoise regroupant des résidents et des expatriés (ALDA) et d'autres ont pu l'être par des entreprises privées dont l'activité a nécessité un point d'eau le temps d'une activité temporaire (réalisation de voirie) avant une rétrocession à l'Etat.

2.1.4. Âge des ouvrages et réhabilitation

L'exploitation des ressources souterraines de la région a commencé au début des années 50, durant la période coloniale française, avec les premiers forages pastoraux essentiellement implantés dans le Ferlo. Ont suivi deux décennies marquées par quasiment très peu de nouveaux ouvrages. A partir de 1975, le Fond Européen de Développement (FED) a appuyé quelques réalisations. En 1980, la "Décennie de l'eau potable et de l'assainissement" (DIEPA) a permis d'insuffler une première dynamique dans la région et de capter des financements notamment auprès de la BADEA, de la BOAD et du FKDEA. Enfin, plus récemment, on note que la création du PEPAM en 2005 pour la coordination des réalisations et l'atteinte des objectifs du millénaire pour l'eau potable et l'assainissement (OMD) a permis une très nette accélération des réalisations de forages, avec notamment l'appui de la Banque Mondiale, de l'UE ou encore du PAISD, ainsi que des premières réhabilitations en 2011.



Chronologie de la réalisation
des forages en région de Matam
(y compris ouvrages abandonnés)



2.1.5. Profondeur et horizons captés

La côte des crépines des forages est très variable en région de Matam et varie en fonction de la ressource captée (cf. 4.1.1.) et surtout de l'éloignement au Fleuve. Ainsi le forage le moins profond est situé à une 15^{aine} de kilomètre du Fleuve et capte à partir de -18m (Hombo) alors que le plus profond, éloigné du Fleuve de 125 km capte jusqu'à -506m (Dounoubel). Entre ces deux côtes extrêmes, on observe une répartition de la profondeur des ouvrages fortement corrélée avec la distance au Fleuve, avec donc logiquement un gradient très marqué entre la zone nord-est où se concentrent, le long du Dandé Mayo, les ouvrages les plus courts, et la zone Ferlo du sud-est présentant, du fait de l'enfoncement de l'aquifère Maastrichtien, les ouvrages les plus profonds (cf. carte suivante). Les quelques rares ouvrages qui ne s'inscrivent pas dans cette logique captent le Continental Terminal.

2.1.6. Equipement tubulaire

Du fait du caractère généralement captif ascendant des aquifères prélevés, la grande majorité des forages, et la totalité des forages profonds, sont réalisés suivant le schéma-type classique du forage télescopé, à savoir (de haut en bas) :

- Chambre de pompage, de diamètre suffisant pour y installer des pompes de débit compris entre 30 et 150 m³/h ; ces diamètres varient de 8" 5/8 (220 mm) à 13" 3/8 (340 mm) ; les tubages sont, pour les forages anciens et profonds, en acier noir, mais les ouvrages récents sont de plus en plus fréquemment tubés en PVC. La profondeur de ces chambres de pompage varie généralement de -40 m à -120 m, avec quelques exceptions pour des profondeurs dépassant 200m (jusqu'à - 281m pour Loumbol Samba Abdoul)
- Cône de réduction, servant de joint diélectrique pour les forages tubés en acier noir et crépinés en inox
- Tube porte-crépines (TPC), de diamètres variant de 4" 1/2 (114 mm) à 8" 5/8 (220 mm) ; leur longueur va d'une dizaine de mètres à 239 m, et leur nature varie de l'acier noir au PVC, en passant par l'inox
- Crépines en une seule ou deux portées (elles sont alors séparées par un tube d'extension de même section) ; leurs diamètres varient de 225 mm à 4"1/2 (114 mm), et leurs matériaux sont les mêmes que ceux des TPC (sur 110 forages renseignés, on dénombre 53 crépines Johnson ou apparentées en inox, 51 crépines en PVC qui sont probablement toutes des crépines à fentes, 4 crépines à persiennes et 1 Hagusta) ; les longueurs (cumulées en cas de portées multiples) varient de 2.8 m à 77 m, la longueur moyenne s'établissant à 19 m
- Tube à sédiments, généralement de même matériau que la crépine ; leur longueur varie de 1 à 12m.

On observe au moins deux catégories d'ouvrages dont la coupe technique diffère de ce schéma type :

- la génération des forages récents, notamment ceux peu profonds réalisés dans le Dandé Mayo (et en particulier les forages solaires du programme PRS II – CILSS) qui présentent souvent des caractéristiques différentes ; ils sont réalisés en PVC de même diamètre sur toute la hauteur (souvent 200 mm). La partie supérieure, entre le niveau statique et le haut des crépines, sert alors de chambre de pompage sur 25 à 100 m de hauteur, et les crépines, en une seule portée, sont vissées en dessous, avec un court tube à sédiments à la base.
- Les anciens forages mixtes (forages-puits ou puits-forages) qui sont pour la plupart aujourd'hui comblés ou fermés, et abandonnés, mais dont il subsiste quelques unités encore

fonctionnelles, au moins partiellement : on citera par exemple le forage-puits Sivi Abe Oriental dont la tête du forage est cimentée, mais le puits toujours exploité par puisage pour l'abreuvement. Rappelons que les forages-puits sont des ouvrages de réalisation délicate, plus chers que les ouvrages classiques, mais que leur concept est très adapté à la zone du Ferlo, puisqu'en cas de panne des équipements d'exhaure, l'alimentation des populations et des troupeaux peut continuer à être assurée par puisage. Pour préserver la qualité de l'eau dans les puits, ceux-ci pourraient être fermés et équipés de pompes à main performantes ou de pompes solaires.

Au niveau des performances, même s'il est logique de penser que les meilleurs débits (ou plutôt débits spécifiques) sont obtenus avec les crépines de type Johnson, et les hauteurs crépinées maximales, et les moins bons avec les crépines à fente PVC, les données disponibles sont insuffisantes pour essayer de corréliser ces éléments.

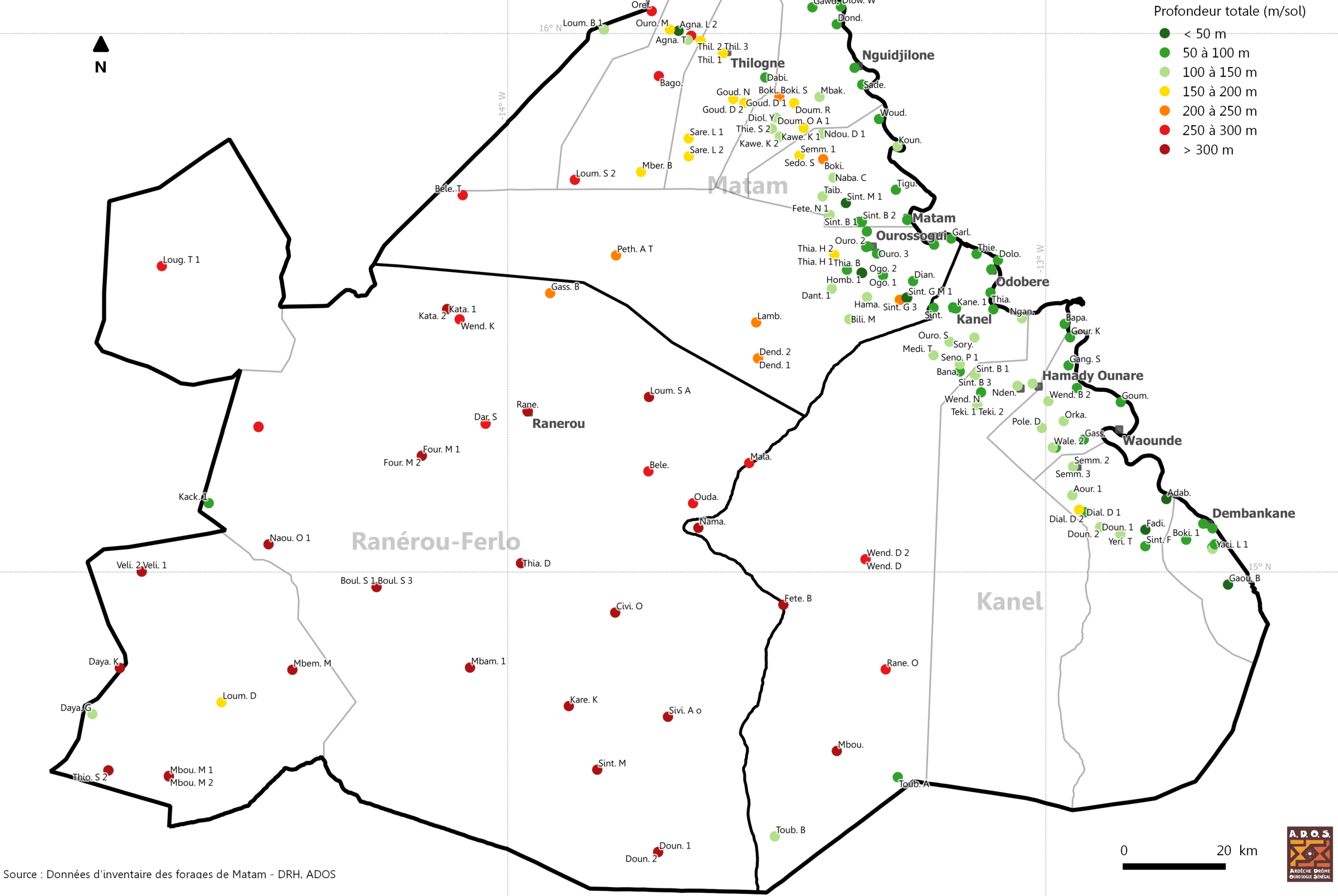
On retiendra uniquement que les forages avec crépines PVC semblent n'avoir jamais été testés au-delà de 60-65 m³/h, et qu'à l'inverse, tous les forages testés pour des débits supérieurs sont équipés de crépines Johnson (jusqu'à 94 m³/h pour le forage Ngano avec 20 m de Johnson inox de 4"1/2).

L'analyse de l'incidence des équipements tubulaires sur la durée de vie des forages n'a pas pu non plus être engagée, à cause du nombre trop faible de forages réellement renseignés, et du manque de recul pour les plus récents. Une telle analyse pourrait faire l'objet d'une mission particulière en prolongement de cet inventaire. Il s'agirait par exemple :

- d'étudier les causes de l'ensablement de certains forages (perforation des crépines par corrosion, ou par déchirures mécaniques lors d'opérations de repêchage de pompes, ou par sur pompage) en les reliant au type et au diamètre des crépines
- d'analyser le comportement des crépines PVC à fentes dans le cas de pompages à débit moyen (puisque ce type d'équipement ne pose pas de problèmes pour les pompes solaires, à faible débit)
- d'étudier l'adaptation des équipements aux différents aquifères (Eocène, Continental Terminal, Maastrichtien)

On voit qu'il y a là une mine de renseignements qu'il serait dommage de ne pas exploiter pour en tirer des conclusions pratiques pour la programmation des nouveaux forages. Mais cette exploitation nécessiterait une plongée dans les données plus complète que celle qui a pu être effectuée dans le cadre de cet inventaire, notamment dans les archives de la DEM et auprès des entreprises de forage.

Profondeur totale des forages de la région de Matam
(y compris ouvrages abandonnés)



Source : Données d'inventaire des forages de Matam - DRH, ADOS

2.1.7. Possibilités de mesure et de prélèvement

2.1.7.1. Possibilité de mesure de niveau piézométrique

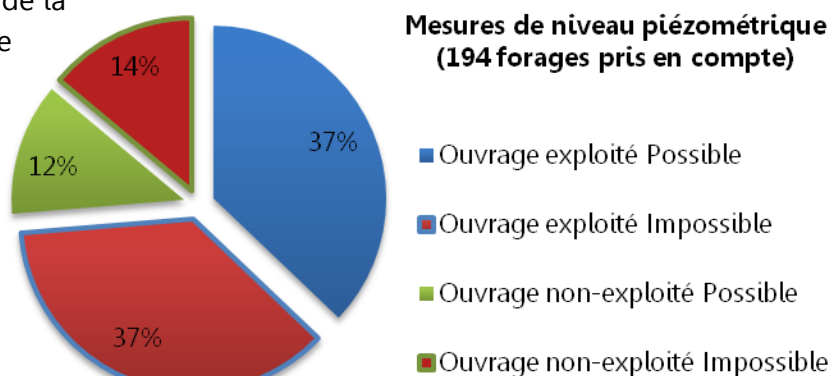
Comme détaillé précédemment, le travail d'inventaire réalisé comprenait notamment la réalisation de mesures de niveaux statiques, et si possible de niveau dynamique dans l'ensemble des ouvrages visités, qu'ils soient exploités ou non. Toutefois sur le terrain, un grand nombre d'ouvrages n'a malheureusement pas pu être sondé, et ce pour différentes raisons :

- Les ouvrages exploités présentent rarement d'orifice conçu pour le passage d'une sonde. Et ce même pour les plus récents.
- Un certain nombre de captages exploités disposent d'un orifice de mesure qui n'est pas fonctionnel, soit parce que la première bride est trop proche de l'ouverture (ouvrages du deuxième programme régional solaire), soit parce la sonde se bloque avant son immersion.
- A quelques très rares exceptions près, les ouvrages abandonnés ne sont pas convertis en piézomètre et ne sont pas non plus rebouchés dans les règles de l'art. Si la tête de forage a été condamnée ou obstruée, il n'est alors plus possible de sonder l'ouvrage.

Heureusement, même si la conception de la tête de forage n'intègre pas d'orifice pour le passage d'une sonde piézométrique, on trouve assez souvent une ouverture utilisable (passage de la corde de suspension de la pompe ou du câble).

Cependant, à l'heure actuelle, la moitié des ouvrages, qu'ils soient exploités ou non, ne permet pas de réaliser de mesure de niveau piézométrique.

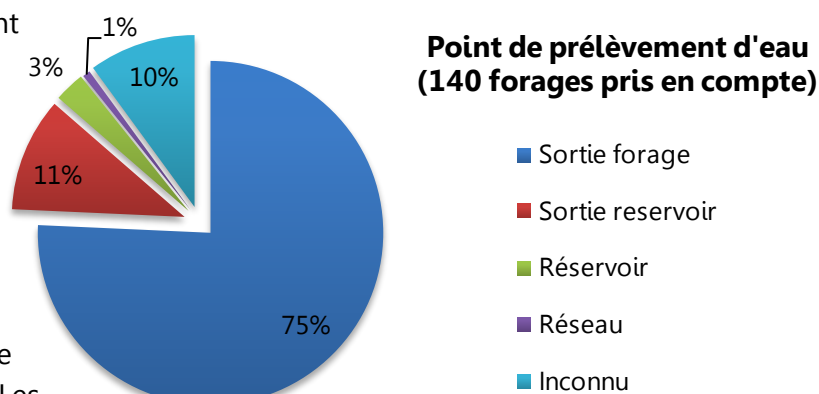
Pour bon nombre d'entre eux, on peut penser que le perçage, en tête de forage, d'un simple orifice fileté protégé par un bouchon vissé serait facilement réalisable et permettrait de multiplier les possibilités de mesures.



2.1.7.2. Possibilité de prélèvement d'eau

Les campagnes de terrain comprenant un petit volet de mesures physico-chimiques et mesures de fer dissous, un point de prélèvement a été recherché sur chaque ouvrage équipé. L'importance du choix de ce point d'échantillonnage vis-à-vis de la validité du dosage du fer a été mise en évidence par la deuxième campagne de terrain (cf. 4.6.2.1.). Les prélèvements suivants ont alors été effectués,

dans la mesure du possible, en sortie immédiate du forage. Environ 10 % des prélèvements effectués avant ce constat ne disposent malheureusement pas d'information sur le lieu du prélèvement.

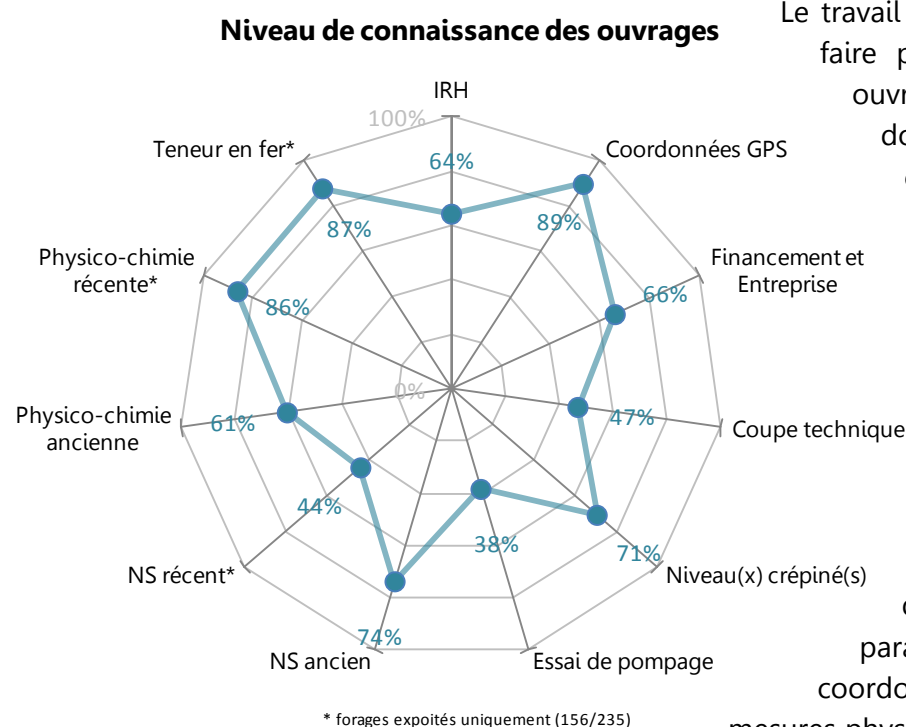


Globalement, un prélèvement d'eau a pu être réalisé en sortie de forage pour 3 ouvrages sur 4. Si dans le cas idéal, un robinet de prélèvement est installé sur le refoulement de la pompe, avant le réservoir, cette configuration est loin d'être généralisée, si bien que bon nombre de prélèvements ont nécessité de dévisser un manomètre, de monter dans les châteaux d'eau prélever sur le refoulement, voire de créer une petite fuite temporaire sur une bride.

Pour environ 14 % des sites visités, le prélèvement n'ayant pas pu être réalisé dans ces conditions, le choix s'est reporté par défaut sur l'eau du réservoir, voire sur un point de distribution (généralement un robinet situé dans le périmètre du forage). Dans ces cas, le temps de séjour dans le réservoir et la décantation ont alors pu altérer la représentativité de la mesure de concentration du fer.

De même que des orifices de mesures piézométriques pourraient être ajoutés facilement sur de nombreuses installations, la généralisation des robinets de prélèvement semble indispensable pour permettre des mesures répétées et représentatives. Cet équipement, peu coûteux, devrait aussi être intégré systématiquement au cahier des charges de tout nouveau forage.

2.1.8. Degré de connaissance des ouvrages



Le travail d'inventaire réalisé a permis de faire progresser la connaissance des ouvrages via la production de données (notamment coordonnées GPS, NS, teneur en fer) mais aussi de rendre disponible, en région de Matam, les informations initialement stockées au niveau central, dans des bases de données ou des documents papier (DGPRE à Dakar).

Ainsi au terme des campagnes de mesure, un certain nombre de paramètres tels que les coordonnées géographiques, les mesures physico-chimiques et la teneur en fer

sont disponibles sur plus de 90 % des ouvrages. Les données anciennes, contenues principalement dans la base de données PROGRES ainsi que dans les rapports de forages et rapports de réhabilitation restent cependant très parcellaires. En cause, la transmission des rapports de réalisation d'ouvrage par les entreprises à l'administration qui, en fonction des périodes, a été plus ou moins défaillante. Ainsi, seuls 34 % des ouvrages de la région disposent d'un rapport archivé à Dakar. De ce fait, la disponibilité d'informations pourtant essentielles à la bonne gestion et au suivi dans le temps des ouvrages reste aléatoire : moins de la moitié des ouvrages dispose d'une coupe technique (48 %) ou d'un essai de pompage (39 %).

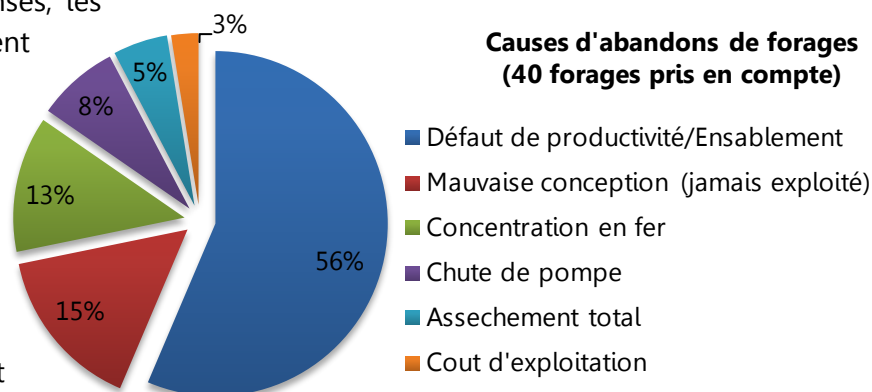
Une autre donnée essentielle à la bonne connaissance des ouvrages est le numéro IRH. Défini notamment en fonction de la position géographique, ce numéro d'immatriculation unique de chaque ouvrage est attribué par la DGPRE, sous réserve que les informations de base sur le génie civil lui parviennent. Cette transmission n'étant pas automatique, de nombreuses lacunes existent, si bien que seul 67 % des ouvrages disposent de leur numéro IRH. Sans ce numéro, les risques de confusion existent entre les ouvrages d'une même zone puisque seul le nom usuel peut être utilisé. Ce dernier

agrège généralement le nom de la localité et le numéro de rang de l'ouvrage attribué par ordre chronologique. L'orthographe des localités étant très fluctuante et l'historique des implantations d'ouvrage restant parfois mal connue, les risques d'erreurs sont importants.

Pour y pallier, les données issues des campagnes de terrain et notamment les informations recueillies sur l'historique des ouvrages ont été transmises à la DGPRE pour rattraper ce retard. Faute de moyens humains, ce travail n'a à ce jour pas été réalisé.

2.1.9. Historique et causes d'abandon des forages

Sur 69 abandons de forages recensés, les causes sont connues ou fortement soupçonnées pour une quarantaine. Ces informations émanent principalement des responsables d'ASUFOR et des notables rencontrés durant les enquêtes, et seuls les cas où les raisons paraissaient cohérentes et faisant l'objet d'un consensus ont été exploités. La DRH a en revanche une bonne connaissance des causes d'abandon sur les cas les plus récents (après 2008). Les causes d'abandon recensées sont les suivantes :



- Un défaut de productivité (56 %) : soit l'ouvrage n'a pas su répondre à une augmentation de la demande, soit il a subitement perdu en performance, jusqu'à devoir être remplacé ou secondé. Pour au moins la moitié d'entre eux, des venues de sables ont été évoquées. Sur les forages-puits, ces phénomènes d'ensablement peuvent entraîner un assèchement total du contre-puits par obstruction de la galerie reliant les deux ouvrages.
- Une mauvaise conception et/ou implantation (15 %) : l'ouvrage n'a jamais été mis en service, souvent parce que les essais de pompage n'ont pas été probants, auquel cas l'ouvrage a généralement été remplacé avant le retrait du chantier (Thiel Sebe F1, Loumbol Baladji F4). Pour de très rares cas, le dimensionnement est clairement en cause (Toubel Bali).
- La présence de fer dans l'eau (13 %) : elle est une cause d'abandon de forages, du fait de la corrosion qu'elle peut entraîner, même si les symptômes ne permettent pas toujours de l'affirmer avec certitude (certains ouvrages dont le tubage corrodé se retrouve sous le niveau d'ensablement notamment) et les investigations qui permettraient de lever ce doute (passage caméra par exemple) sont rarement mises en œuvre. Dans certaines localités cela conduit à un renouvellement très fréquent des ouvrages (Sinthiou Garba, Seno Palel), mais ce phénomène est vraisemblablement sous-estimé. A noter au moins un cas de forage fonctionnel abandonné à cause des désagréments occasionnés par les propriétés organoleptiques de l'eau (Thiancone Hiraye F1).
- La chute de la pompe (8 %) : l'équipement n'est parfois pas repêchable ce qui oblige alors à remplacer l'ouvrage (Thiagnaf F2, Bokiladji F1, Doundé F1). Il arrive également que les opérations de repêchage conduisent à une détérioration des tubages et/ des crépines.
- Assèchement de l'ouvrage (5 %) : il est occasionné par une baisse du niveau statique jusqu'à une cote critique qui ne permet plus le fonctionnement normal de l'ouvrage (Boulone Seno F1). Dans le cas de forages-puits, le contre-puits a pu être sur-créusé pour capter la première nappe (Mboundoum Mbaba F1), mais ce type de réparation est rarement durable.

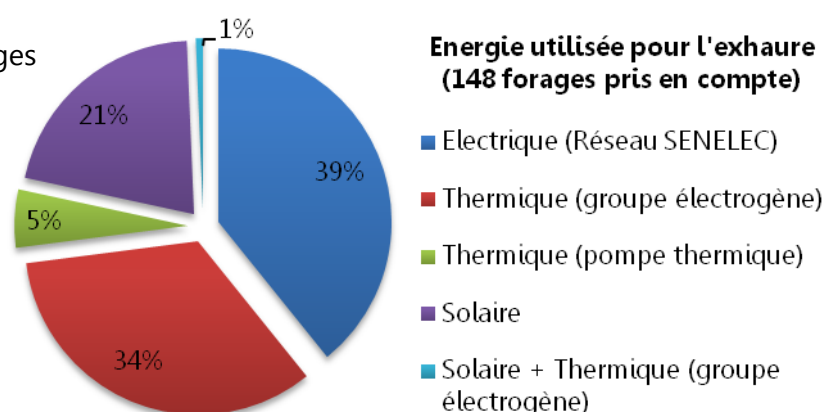
- Les coûts d'exploitation (3 %) : Ce cas est généralement rencontré au niveau d'ASUFOR exploitant plusieurs forages et différentes énergies. Le forage à l'énergie la plus chère (groupe électrogène) est alors parfois mis à l'arrêt au profit d'une augmentation de la production sur un ouvrage souvent plus récent et moins cher à exploiter (réseau SENELEC). L'ouvrage est donc non-exploité mais reste fonctionnel (Dialloube Diamouguel F1).

2.2. Equipements d'exhaure

2.2.1. Energie exploitée

En région de Matam, les forages motorisés utilisent trois sources d'énergie, avec localement quelques spécificités :

- L'énergie électrique
- L'énergie thermique
- L'énergie Solaire



2.2.1.1. Energie thermique

L'énergie thermique est toujours la solution privilégiée pour l'exhaure en région de Matam, et ce en raison de la faible couverture du réseau SENELEC. Le fonctionnement du forage est alors assujéti à l'approvisionnement de l'ASUFOR en carburant, ce qui peut parfois être problématique dans les zones les plus reculées. Parmi ces forages on note deux cas de figure :

- Le couplage d'un groupe électrogène avec une pompe électrique immergée qui est le cas le plus fréquent et qui concerne 40 % des forages de la région (environ 28 % du volume produit quotidiennement). On trouve ce type d'installation dans l'ensemble de la région, et préférentiellement dans le Diéri et le Ferlo.
- La pompe thermique à axe vertical (cf. 2.2.2), qui a tendance à progressivement disparaître au profit de la solution précédente mais qui représente encore environ 5 % des systèmes AEP exploités (4 % du volume produit). On trouve ces pompes sur des forages relativement anciens, aussi bien dans le Dandé Mayo que dans le Ferlo.

En termes d'entretien, ces solutions à énergie thermique présentent l'inconvénient de nécessiter des maintenances régulières (vidanges, nettoyage/remplacement de filtres sur les groupes, graissage de l'arbre sur les pompes à axe vertical, etc.) qui peuvent remettre en cause la durée de vie des équipements s'ils ne sont pas bien entretenus. Certaines ASUFOR ont aussi parfois recours à du carburant de contrebande et/ou à l'utilisation d'huile de qualité non contrôlée qui vont aussi dans le sens d'un vieillissement prématuré des moteurs.

2.2.1.2. Energie électrique

Le couplage de l'énergie électrique, en provenance du réseau SENELEC, avec une pompe immergée ne concerne que 40 % des forages exploités mais un peu plus de la moitié des volumes produits (59 %). La quasi-totalité de ces forages se situe sur l'axe électrifié longeant la RN2 (Orefonde-Bokiladji), sur quelques axes secondaires proches et dans certaines zones électrifiées du Dandé Mayo. Cette solution à priori plus économique et plus simple en matière d'exploitation et de maintenance est maintenant presque généralisée à tous les systèmes AEP éligibles. Avant cela, nombre d'ASUFOR se sont heurtés à des lenteurs administratives occasionnant des délais en mois voire années, pour la mise en place du compteur, du transformateur électrique nécessaires à leur raccordement, avant l'ouverture effective de leur abonnement.

2.2.1.1. Energie solaire

Environ un forage sur 5 fonctionne à l'énergie solaire, mais ces ouvrages ne contribuent qu'à hauteur de 6 % de la production journalière du parc régional. Quasiment tous ont été réalisés dans le cadre de deux programmes régionaux solaires dans les années 1980, puis 2000 ; il s'agit uniquement de systèmes équipés d'onduleurs et fonctionnant au fil du soleil, c'est à dire sans accumulateur. Si elle permet une production d'eau à moindre coût, et avec relativement peu d'entretien, cette solution ne présente pas autant de souplesse que celles de l'énergie électrique ou thermique. L'énergie solaire est en effet disponible et abondante quasiment toute l'année en région de Matam, mais ne permet pas de faire face à d'importantes variations d'exploitation (à moins de surdimensionner les installations). La grande majorité des forages solaires ont donc été installées dans le Dandé Mayo, où le fleuve est encore utilisé pour bon nombre d'usages (abreuvement du bétail, irrigation, lessive notamment). L'utilisation de l'eau du forage se limite alors aux usages domestiques, relativement constants dans l'année, ce qui explique la faible part d'eau produite à l'énergie solaire par rapport au nombre relativement important de forages. Même dans ces conditions, en cas de couverture nuageuse, certains points de production peuvent ponctuellement rencontrer des difficultés à faire face à la demande, du fait du choix de l'énergie solaire, et alors que le potentiel des ouvrages est souvent nettement plus important que l'exploitation qui en est faite.

Parmi les forages du premier programme solaire dont certains ont été positionnés dans le Diéri, plusieurs se sont révélés insuffisants pour faire face aux fortes demandes en fin de saison sèche. Certains ont été soulagés par un nouvel ouvrage (Hombo, Tekinguel) ou par un groupe électrogène permettant d'étendre la fenêtre de pompage (Tiankone Hiraye), parfois l'installation solaire a été totalement remplacée par un groupe électrogène (Banadji) ou par un raccordement au réseau SENELEC (Diamel, Sinthiou Mogo F1).

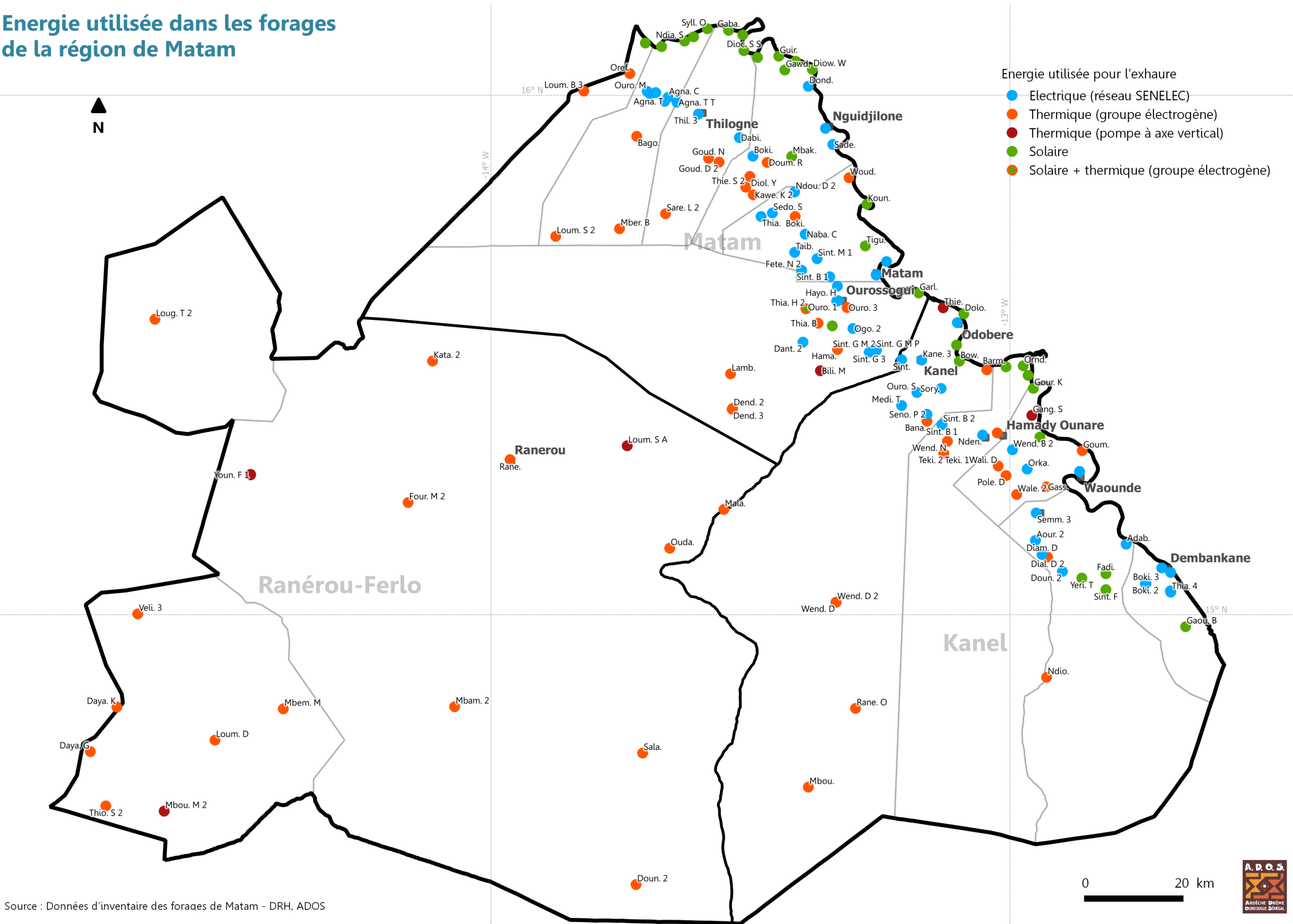
Malgré ces quelques réserves quant aux périodes de pointe ou au manque de souplesse, les installations solaires sont généralement bien accueillies par les populations et, avec l'amélioration des performances du matériel, il est clair que l'utilisation de cette énergie est pertinente, au moins pour les besoins inférieurs à 150 m³/j et qui sont relativement stables d'une saison à l'autre.

A noter qu'au moment de la rédaction de ce document, un programme d'électrification en solaire d'une trentaine d'ouvrages (forages initialement équipés de pompe manuelle et puits) est mené avec l'appui de l'ONG ACRA.

Energie utilisée dans les forages de la région de Matam



- Energie utilisée pour l'exhaure
- Electrique (réseau SENELEC)
 - Thermique (groupe électrogène)
 - Thermique (pompe à axe vertical)
 - Solaire
 - Solaire + thermique (groupe électrogène)



Source : Données d'inventaire des forages de Matam - DRH, ADOS



2.2.2. Caractéristique des pompes

2.2.2.1. Types de pompe

On rencontre deux types de pompes sur le parc de forage de la région de Matam :

- Les pompes immergées (électriques) classique, qui équipent 95 % des ouvrages et qui peuvent être alimentée par le réseau électrique SENELEC, un groupe électrogène ou une installation solaire.
- Les pompes centrifuges à axe vertical (thermique), qui ont tendance à être remplacées par des pompes immergées mais que l'on trouve encore dans 8 forages de la région. Généralement robustes, les pompes à axe vertical peuvent présenter des longévités exceptionnelles, sous réserve qu'elles soient bien montées et entretenues (bon alignement et lubrification régulière de l'arbre notamment).



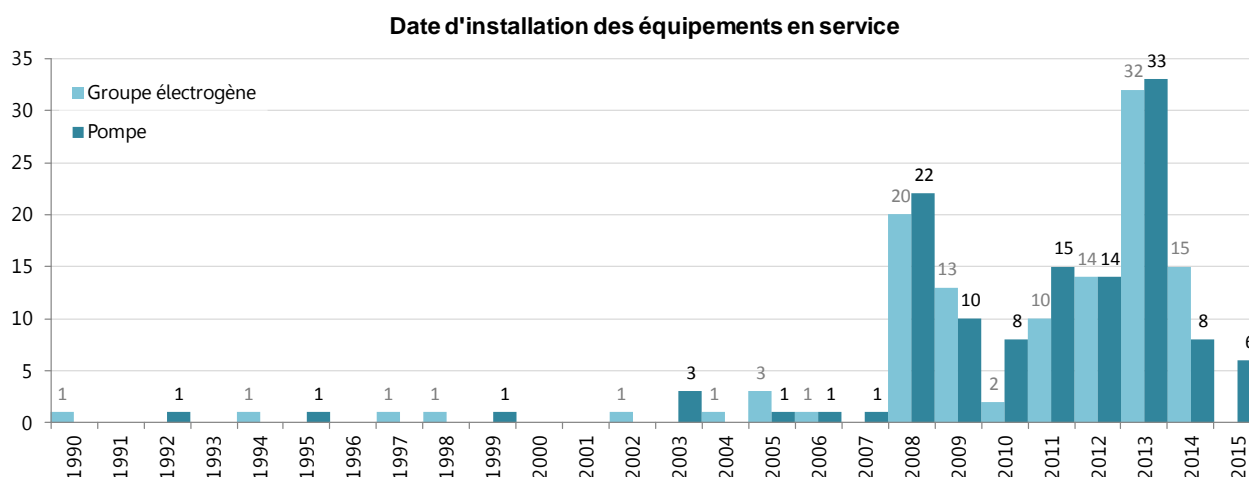
Pompe à axe vertical - Younouféré
(Source : ADOS)

2.2.2.2. Année d'installation

Habituellement, les pompes immergées sont considérées comme amorties après 20 000 heures de fonctionnement. A raison de 5h de pompage quotidien, ces équipements sont donc donnés pour une durée d'environ 10 ans. A titre de comparaison, les groupes électrogènes sont généralement conçus pour 10 000 heures de pompage et donc une durée de moitié.

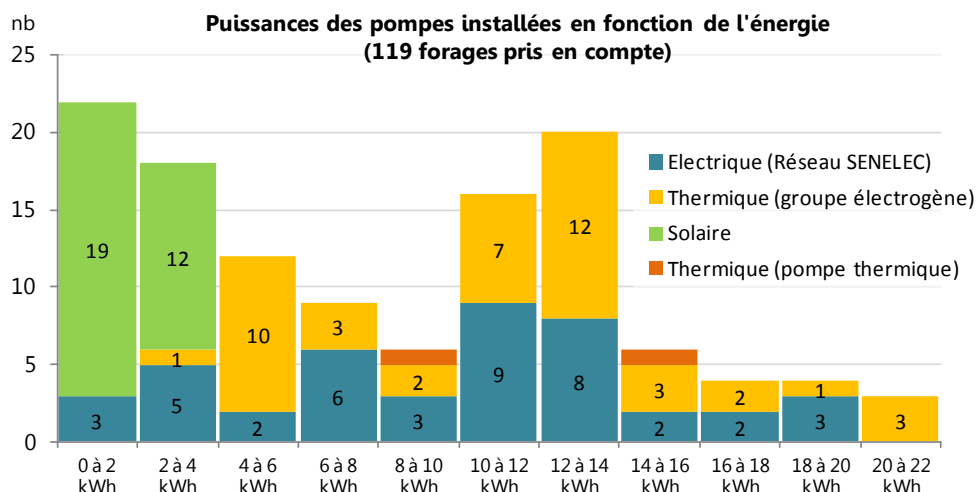
En région de Matam, le nombre de pompes datant de plus de 10 ans est très faible (environ une dizaine), la grande majorité ayant été installées après 2008. Sur cette base uniquement, le parc de pompes ne semble donc pas dans un état de vieillissement préoccupant, mais il peut y avoir localement des équipements plus sollicités que d'autres avec des durées d'amortissement moindre.

On note que les dates d'installation des pompes coïncident largement avec celle d'installation des groupes, alors que ces derniers sont généralement donnés pour une durée de vie plus courte. Leur renouvellement devrait être plus fréquent et il est donc probable qu'un certain nombre d'entre eux aient dépassé leur durée de vie théorique.



2.2.2.3. Puissance

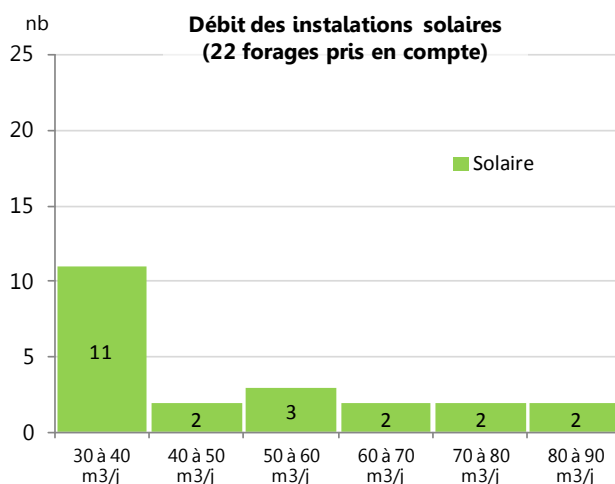
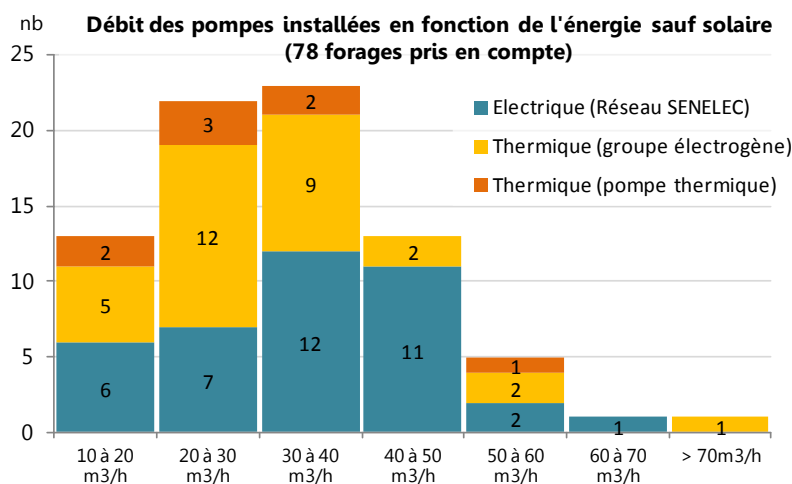
Le parc de pompes installé dans les forages de Matam couvre une large gamme de puissance allant de 0.95 à 22,5 Kw, avec plus de 85 % d'entre elles ne dépassant pas 13 Kw. La puissance des pompes est en toute logique fortement liée à l'énergie utilisée pour l'exhaure.



Ainsi les forages alimentés au fil du soleil sont majoritairement équipés de pompes de faible puissance, de 1.4 ou 2.2 Kw, alors que les forages alimentés par le réseau SENELEC ou par un groupe sont majoritairement équipés de pompes de 13, 11 ou 5.5 Kw.

2.2.2.4. Débit théorique

Forages solaires exclus, on note que 4 pompes installée sur 5 présentent un débit théorique compris entre 20 et 50 m³/h. Du fait de leur alimentation fluctuante durant la journée, les équipements solaires sont généralement donnés pour un débit journalier. En région de Matam, la moitié d'entre eux ont un débit théorique journalier inférieur à 40 m³/j.



2.2.3. Comptage de production

Le compteur de production, situé en sortie de forage, est un élément indispensable d'un système d'alimentation en eau potable, qui participe :

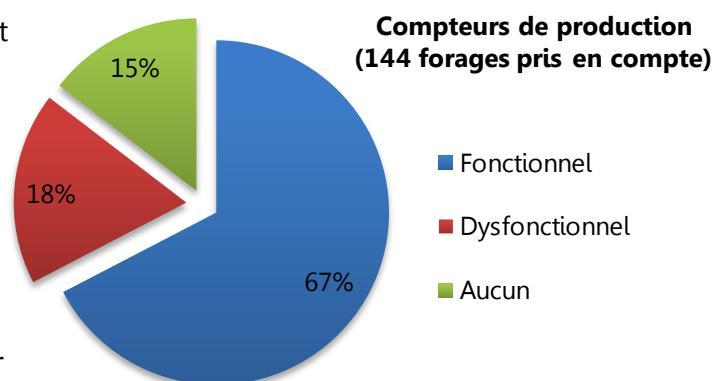
- au suivi technique de l'ouvrage, la détection d'une baisse spontanée de débit étant souvent symptomatique d'un vieillissement de la pompe ou de l'ouvrage
- au suivi des performances du réseau, la comparaison des volumes produits et distribués puis l'estimation des volumes de fuite permettant de calculer un certain nombre d'indicateurs de performance, notamment le rendement de réseau (ce qui sous-entend que chaque point de

distribution dispose d'un compteur fonctionnel et que les relevés se fassent sur un temps assez court)

- au suivi du système AEP dans le temps et à la connaissance de son fonctionnement (quantification des variations inter-saisonnières et interannuelles de la demande en eau, anticipation des pic de consommation, estimation des besoins futurs,...)
- au suivi de la ressource en eau grâce à la quantification des prélèvements réalisés

Les compteurs qui équipent les forages de la région sont généralement des compteurs à turbine, dont le nombre de rotations est converti en volume affiché sur le cadran. Ce type de compteur présente l'avantage d'être assez peu sensible aux impuretés contenues dans l'eau, mais du fait des pièces en mouvement, il est sujet à l'usure, au colmatage, et peut aussi être perturbé par d'éventuels dépôts de fer (cf. 4.6.1.5.).

85 % des ouvrages actuellement exploités sont équipés en compteurs de production. Parmi eux, environ les deux tiers sont réellement fonctionnels, ou semblaient l'être puisque présentant des valeurs de débit cohérentes (ce qui n'exclut pas que certains puissent être partiellement colmatés ou usés). Environ 18 % ne sont pas fonctionnels, soit complètement hors service, soit tournant par intermittence et dans tous les cas à remplacer.



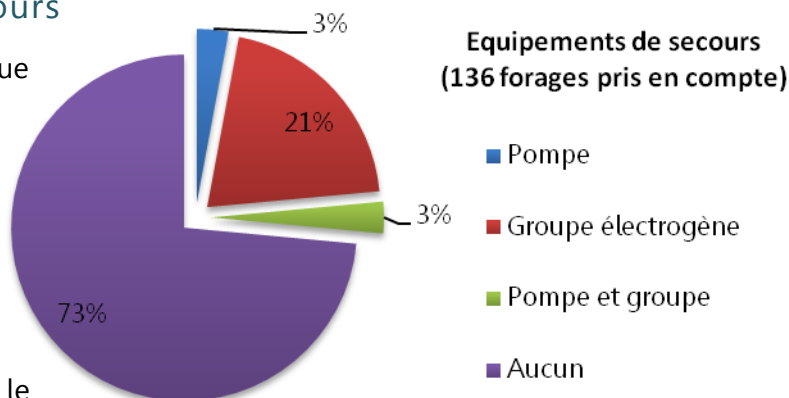
Enfin 15 % des forages restant ne disposent pas de dispositif de comptage, et n'en ont jamais été équipés. Il s'agit en moyenne de forages un peu plus anciens que ceux disposant d'un compteur. Pour un certain nombre d'entre eux, la configuration de l'installation ne permet à priori pas de rajouter cet élément aisément, sans modifier le refoulement, par manque d'une section horizontale adaptée.

On notera donc qu'un tiers des installations AEP de la région ne sont pas en mesure de suivre leur production, ce qui est relativement important et entraîne un manque évident de données sur le fonctionnement de ces installations et la quantification de leur prélèvement sur la ressource naturelle. Un meilleur suivi des prélèvements en région de Matam semble passer nécessairement par une sensibilisation des ASUFOR sur l'aspect stratégique de cet équipement, et sur l'importance de le maintenir en bon état.

2.2.4. Equipements de secours

Sur les sites exploités, on note que seulement un quart dispose d'équipement d'exhaure de secours, en cas de panne sur le matériel installé. Il s'agit généralement d'un groupe électrogène provenant :

- d'un forage récemment abandonné à proximité dont le groupe a pu être repositionné en secours
- d'un raccordement récent au réseau SENELEC avec conservation du groupe en place



Afin que ces équipements puissent être remis en service rapidement en cas de nécessité, il conviendrait de les entretenir, de les mettre en fonctionnement régulièrement et de stocker une quantité minimum de carburant. Les enquêtes ont montré que ces conditions sont rarement réunies, notamment sur les sites où les coupures de courant du réseau SENELEC sont rares ou suffisamment courtes dans le temps pour que la nécessité de relancer un groupe ne se fasse pas sentir.

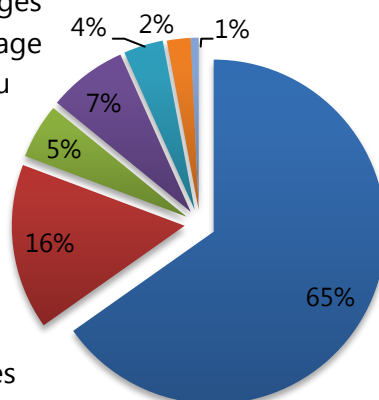
Dans quelques cas plus rares (6 %), l'ASUFOR dispose d'une pompe de secours récupérée souvent suite à un programme de renouvellement initié par l'Etat, ou l'achat sur fond propre.

2.3. Ouvrages de stockages et de distribution

2.3.1. Types de réseau d'adduction

En région de Matam, les 2/3 des forages sont dédiés à l'alimentation d'un village unique, ce qu'on appelle AEV ou alimentation en eau villageoise. C'est le modèle qui est rencontré dans la majorité des systèmes AEP du Dandé Mayo et du Diéri proche de l'axe routier goudronné. Quand il s'agit d'alimentation en eau multi-villages (AEMV), le nombre de localités polarisées est souvent faible ; on ne compte que 7 %

d'ouvrage alimentant un réseau de plus de 3 localités distinctes. Pour les nouvelles réalisations, notamment dans le Diéri plus éloignés et le Ferlo où les ouvrages sont nécessairement profonds et coûteux, la faisabilité des AEMV est plus souvent étudiée, comme à Mberla Bélé où une dizaine de villages ont été raccordés à un réseau unique d'une trentaine de kilomètres. Ces initiatives autrefois rares sont aujourd'hui généralisées à travers la majorité des programmes de l'Etat et des partenaires à Matam (PEPAM-IDA, PUDC, etc.).



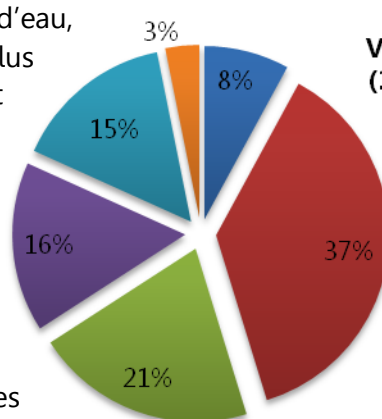
**Taille des systèmes AEP
(135 forages pris en compte)**

- Alimentation villageoise
- AEMV (2 villages)
- AEMV (3 villages)
- AEMV (4 villages)
- AEMV (5 villages)
- AEMV (6 villages)
- AEMV (10 villages)

2.3.2. Ouvrages de stockage

On trouve 3 types d'ouvrage de stockage en région de Matam :

- Les réservoirs sur tour, ou château d'eau, sont les plus répandus et les plus adaptés aux systèmes AEP disposant d'un réseau d'adduction. Ils permettent en effet la mise sous pression et la desserte à un débit satisfaisant dans un rayon plus ou moins étendu autour de l'ouvrage, en fonction de sa hauteur et du relief. En région de Matam, les $\frac{3}{4}$ d'entre eux ont des contenances comprises entre 50 et 200 m³ :



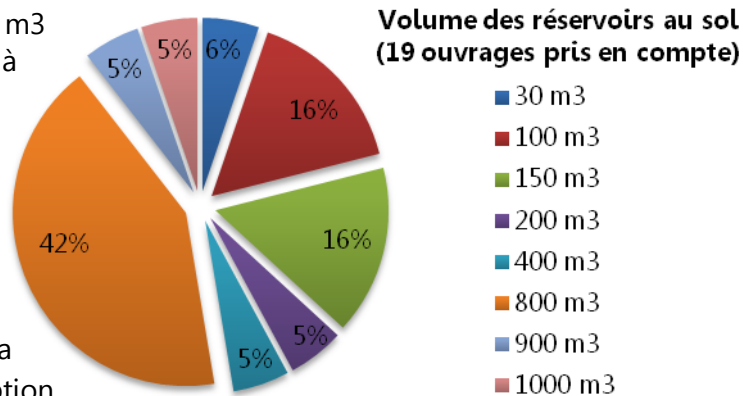
**Volume des réservoirs sur tour
(126 ouvrages pris en compte)**

- 0 à 50 m³
- 50 à 100 m³
- 100 à 150 m³
- 150 à 200 m³
- 200 à 250 m³
- > 250 m³

- les ouvrages de plus de 100 m³ présentent couramment une hauteur sous radier comprise entre 15 et 20 m permettant la desserte de villages éloignés de plusieurs kilomètres voire dizaine de kilomètres de distance, quand la topographie s'y prête.

- les ouvrages de 50 à 100 m³ sont en moyenne perchés à 10m du sol et sont généralement destinés à l'alimentation d'un petit réseau villageois.

D'un point de vue sanitaire, ces ouvrages sont les seuls qui soient adaptés et recommandables pour la consommation humaine. Leur conception permet en effet de réaliser les vidanges, nettoyages et désinfections régulières qui s'imposent en matière de santé publique.



- Les réservoirs au sol sont quasiment exclusivement implantés dans le Ferlo et dans les localités à dimension pastorale. Ce type d'ouvrage avait initialement pour seule vocation le stockage et l'alimentation du bétail au moyen d'abreuvoirs situés à proximité immédiate de l'ouvrage. Du fait de la faible charge, ils n'autorisent pas la création d'un réseau d'adduction. Leur contenance est variable en fonction de l'affluence en bétail dans la zone en saison sèche ; ils font couramment plusieurs



Réservoir au sol – Lougré Thioly
(Source : ADOS)

centaines de m³, la moitié d'entre eux contenant plus de 800 m³.

Ce type d'ouvrage implanté de manière exclusive sur un point d'eau présente des risques sanitaires importants pour les populations, au sens où il ne leur laisse pas d'autre choix que de se tourner vers des ressources en eau de moins bonne qualité (puits, marres, si tant est qu'ils existent) ou de se ravitailler directement dans ces réservoirs par siphonage et remplissage de bidons, tonnes, chambres à air, etc. De plus, il est courant que les conduites d'alimentation des abreuvoirs finissent par s'obstruer, rendant ces ouvrages alors inopérants. Le bétail est alors finalement abreuvé par siphonage et déversement de l'eau aux abords immédiats du réservoir, provoquant la formation de bourbiers dans lesquels se côtoient bétails, charrettes et populations, avec les risques sanitaires évidents.



Petit réservoirs surélevés – Wali Diala
(Source : ADOS)

- Les petits réservoirs surélevés, sont encore rencontrés dans quelques rares localités (Wali Diala), composés d'une cuve de quelques m³ dont le radier a été positionné à moins de 5 m de hauteur. Ce type de stockage ne peut alimenter que de tout petits réseaux ne comptant que quelques points d'eau public et/ou communautaires.

2.3.3. Ouvrages de distribution

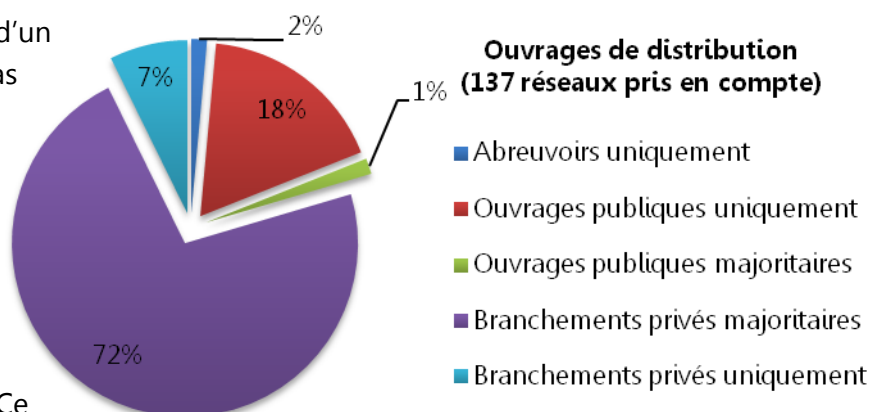
Dans les localités équipées d'un forage d'eau potable, il n'est pas rare qu'une partie de la population continue d'utiliser l'eau provenant d'autres ressources pour la consommation humaine, et notamment les puits traditionnels, avec les risques sanitaires que l'on connaît. Ce comportement s'explique notamment par

le prix de l'eau souvent dissuasif face à l'accès aux puits, mais aussi potentiellement par la proximité du point d'eau ; s'approvisionner à une borne fontaine pour l'eau de consommation quand sa concession est équipée d'un puits n'est pas toujours considéré comme un progrès, même si c'est la garantie d'une bonne qualité et la suppression d'une corvée souvent dévolue aux femmes. Pour y pallier, l'équipement des concessions en branchements particuliers, en plus de la sensibilisation nécessaire, est un premier pas vers la diminution de la consommation d'eau non potable par les populations et donc des risques sanitaires afférents.

Dans cette optique, le programme PEPAM-IDA a subventionné la réalisation de plus de 5 000 branchements sociaux dans la région ces 3 dernières années. Parallèlement à ce programme, de nombreuses ASUFOR se sont aussi saisies de cette problématique. Cette priorité a aussi été reprise par l'OFOR dès sa création, qui ambitionne d'équiper chaque concession d'un branchement privé partout où cela est possible.

A terme, pour les réseaux déroulant une politique de réalisation de branchements privés, les bornes fontaines sont appelées naturellement à disparaître. C'est aujourd'hui ce que l'on observe sur 7 % des réseaux de la région de Matam où les bornes fontaines ne sont plus opérationnelles, contre 18 % qui ne disposent encore pas de branchements privés. Entre ces deux schémas, environ $\frac{3}{4}$ des ASUFOR se trouvent dans une situation intermédiaire où une partie seulement des usagers disposent d'un point d'eau privé, complété par quelques bornes fontaines.

Enfin dans une toute petite proportion (2 %), on trouve des forages dédiés théoriquement uniquement à l'abreuvement du bétail et ne disposant d'aucun ouvrage de desserte à destination des populations.



2.3.4. Comptage de distribution

Une des préoccupations des enquêtes faites sur le terrain était de vérifier les pratiques des ASUFOR en matière de comptage de distribution et de facturation. A quelques très rares cas près d'ASUFOR se déclarant dans l'incapacité de réunir les financements nécessaires à l'équipement systématique des branchements privés en compteurs, ou encore de forages où les populations sont réfractaires à la création d'une ASUFOR (Dolol), la quasi-totalité des branchements de la région sont équipés d'un compteur de distribution autorisant une tarification volumique. Seule cette configuration permet un réel suivi des volumes vendus vis-à-vis des volumes produits, et un suivi du recouvrement objectif.

Pour les autres, un système de tarification forfaitaire mensuel est généralement en place, avec toutes les lacunes que cela peut occasionner sur le suivi et la gestion de l'ouvrage.

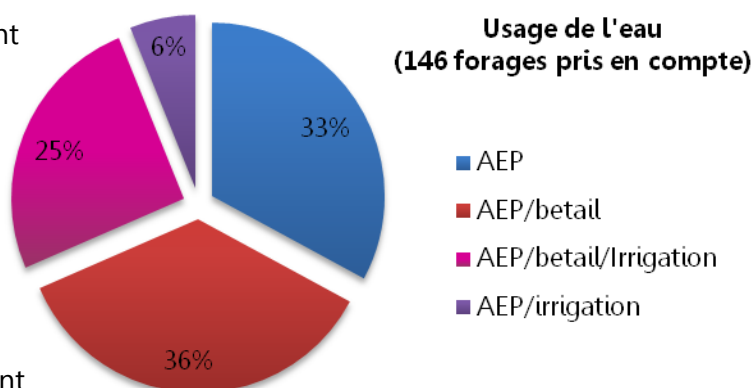
3. Usages de l'eau, pratiques d'exploitation et de gestion

3.1. Usages de l'eau

3.1.1. Alimentation en eau potable

La Division Régionale de l'Hydraulique étant compétente sur l'ensemble des ouvrages ayant trait aux usages domestiques (alimentation en eau potable des populations), cet usage est donc le point commun de tous les forages étudiés et inventoriés.

Parmi eux, 33 % sont exclusivement utilisés pour l'eau domestique. Ces derniers sont quasiment tous situés sur le Dandé Mayo où les autres usages sont assurés par le fleuve (abreuvement du bétail, irrigation de cultures), et le long de l'axe RN2 dans une moindre mesure. Ils totalisent environ 22 % de la production régionale.



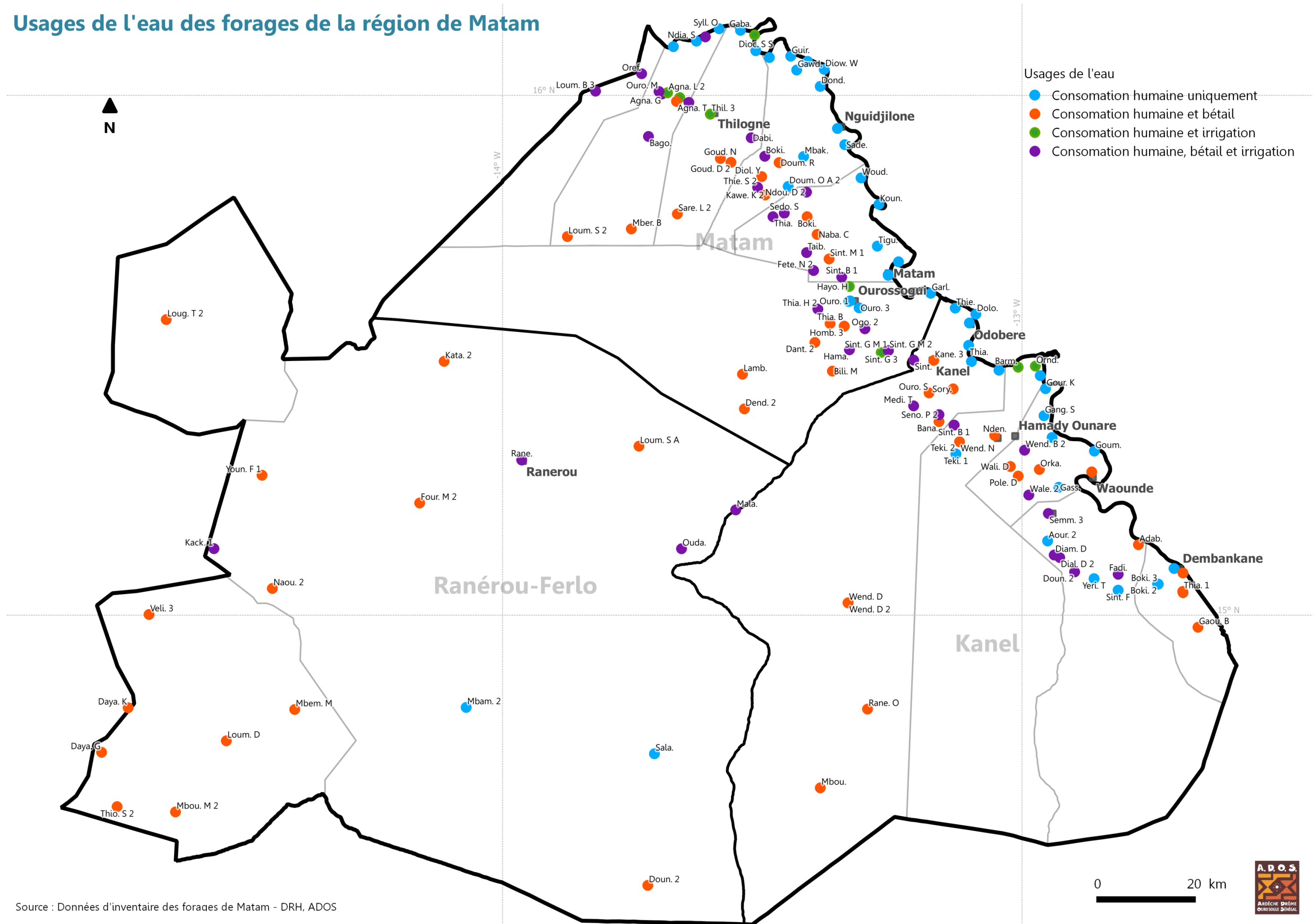
3.1.2. Abreuvement du bétail

Au niveau de certains sites de production qui polarisent un cheptel important, l'abreuvement du bétail peut devenir l'usage principal. A ce titre, 61 % des ouvrages, produisant environ 2/3 de la production régionale, alimentent des abreuvoirs. Ils sont pour beaucoup situés dans le Diéri et évidemment dans le Ferlo, zone où tous les forages sont concernés par cet usage. La sécheresse dans le Diéri après l'hivernage, la disponibilité de pâturage dans le Ferlo et la transhumance font que le Ferlo accueille les plus gros forages pastoraux de la région.

3.1.3. Irrigation de cultures

L'irrigation est le troisième usage de l'eau en région de Matam et concerne 33 % des forages (regroupant 46 % des prélèvements, la part de ce volume attribué réellement à l'irrigation n'étant pas connue). On rappelle que seuls les forages concernés par l'usage domestiques ont été pris en compte dans les campagnes de terrain, ce qui exclut donc les forages à vocation uniquement agricole. Malgré cela, une petite centaine de jardins alimentés par des ouvrages ont été recensés, presque uniquement dans le Diéri. Quasiment tous ces ouvrages ont initialement été réalisés pour l'usage domestique, après quoi des projets de maraîchage, souvent géré par des groupements villageois, ont vu le jour, sur des surfaces comprises entre 1 et 5 ha tout au plus. A l'inverse, de rares forages ont parfois été créés pour des besoins agricoles avant l'alimentation des populations, comme c'est le cas à Wendou Bosseabé où le gérant privé du périmètre irrigué de 12 ha gère aussi le forage, dont moins de 20 % de la production est destiné à l'usage domestique.

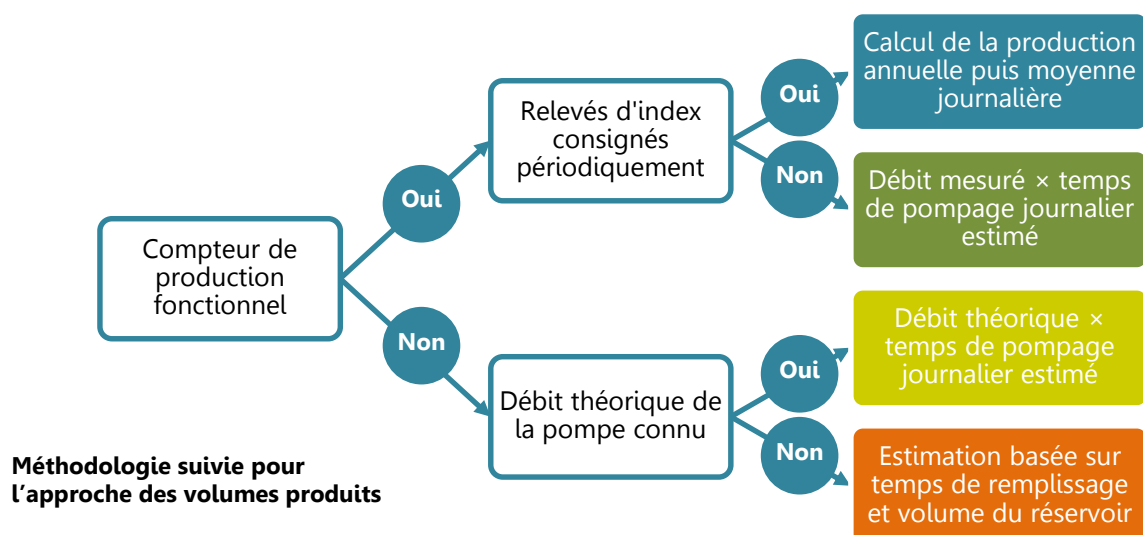
Usages de l'eau des forages de la région de Matam



3.2. Exploitation

3.2.1. Volumes produits

Sur environ 90 % des ouvrages exploités, une estimation de la production, plus ou moins précise, a pu être faite. Cependant, les équipements de comptage et les pratiques de suivi de la production étant hétérogènes d'un ouvrage à l'autre, différentes méthodologies ont dû être appliquées en fonction des cas :



Pour les 10 % d'ouvrages restants, soit ils n'ont pas été visités et les données de suivi disponibles à la DRH ne permettent pas d'estimer la production, soit le suivi de l'ASUFOR est trop défaillant et les incertitudes trop grandes pour estimer les volumes prélevés.

Le volume moyen d'exhaure des ouvrages visités s'élève à 205 m³/j, avec une valeur médiane à 150 m³/j. Quelques rares forages, uniquement à usage domestique, produisent parfois moins de 10 m³/j (Sylla Worgo), tandis qu'à l'extrême, le forage de Kanel produit 1200 m³/j.

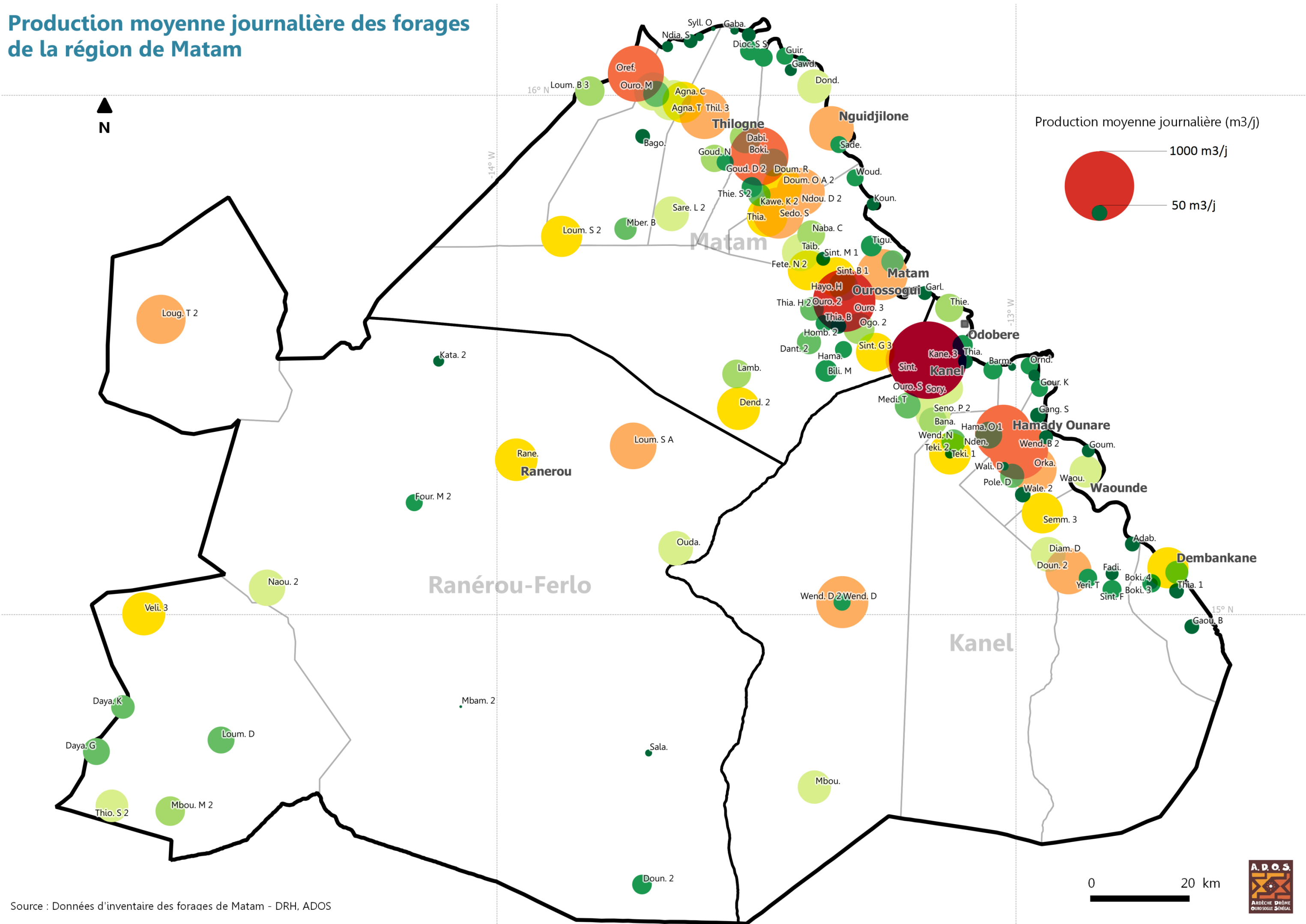
Sur les 156 ouvrages exploités, 123 des 138 visités disposaient de données suffisantes pour faire une estimation de la production. On peut alors évaluer à 25 000 m³/j la production moyenne cumulée, lissée sur l'année, de ces forages. Une extrapolation simple de cette estimation sur l'ensemble des ouvrages motorisés de la région ayant au moins un usage domestique permet d'obtenir un premier chiffre de 30 000 m³/j.

La répartition géographique de la production met en évidence que la grande majorité des besoins sont concentrés dans le Diéri, le long de l'axe goudronné de la RN2, là où se concentre une grande partie de la population régionale. Parallèlement, les forages du Dandé Mayo, relativement nombreux, produisent généralement assez peu (< 50 m³/j) et ce tout au long de l'année, ce qui s'explique par le fait que de nombreux usages de cette zone sont encore assurés par le fleuve (abreuvement du bétail, lessive,...).

A l'inverse les ouvrages du Ferlo sont souvent assez productifs, et ce du fait de la problématique pastorale, mais ces prélèvements présentent généralement une forte variation inter-saisonnière. En effet le bétail s'abreuve prioritairement dans les mares en saison humide, mais dès leur assèchement (8 à 10 mois/an en année moyenne), la grande majorité du bétail se rassemble autour des abreuvoirs des forages pastoraux. Ce phénomène est encore amplifié par le passage, plus ou moins durable, de bétail transhumant en provenance d'autres régions où la sécheresse et le manque d'eau et de

fourrage ont des effets plus marqués. Cela se traduit alors par des pics de consommation bien plus importants que dans le Diéri ou le Dandé Mayo. Si l'on considère la soixantaine d'ouvrages pour laquelle le pic de consommation annuel peut être estimé, on observe que les trois seuls ouvrages présentant un pic d'exhaure plus de 10 fois supérieur à leur moyenne journalière de production sont tous dans le Ferlo (Katané, Wendou Diohi et Fourdou Mbaila). A noter aussi que la production de ces ouvrages en saison sèche est fortement liée à la disponibilité du pâturage, et donc à la quantité de précipitation utile tombée durant l'hivernage. La variation interannuelle des prélèvements effectués dans ces ouvrages peut alors être importante selon l'hivernage.

Production moyenne journalière des forages de la région de Matam



3.2.2. Potentiel de production et taux d'exploitation des ouvrages

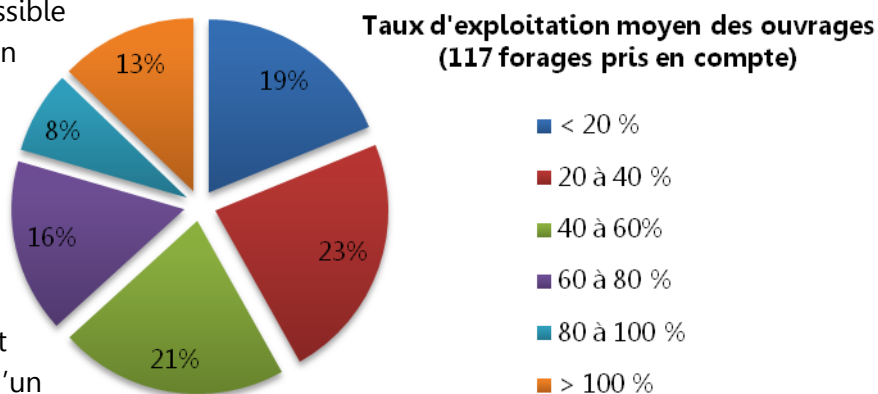
Pour apprécier le potentiel de production des ouvrages, a été estimé dans la mesure du possible le volume de prélèvement qui correspondrait, avec les installations d'exhaure en place, à un volume maximum admissible selon les règles suivantes :

- Forage raccordé au réseau SENELEC : 20h de pompage par jour
- Forage équipé d'une pompe thermique ou d'une pompe électrique alimentée par un groupe électrogène : 8h de pompage par jour de manière à préserver le moteur de la chaleur durant les heures les plus chaudes
- Forage solaire : Volume journalier pour lequel l'installation a été dimensionnée et réceptionnée

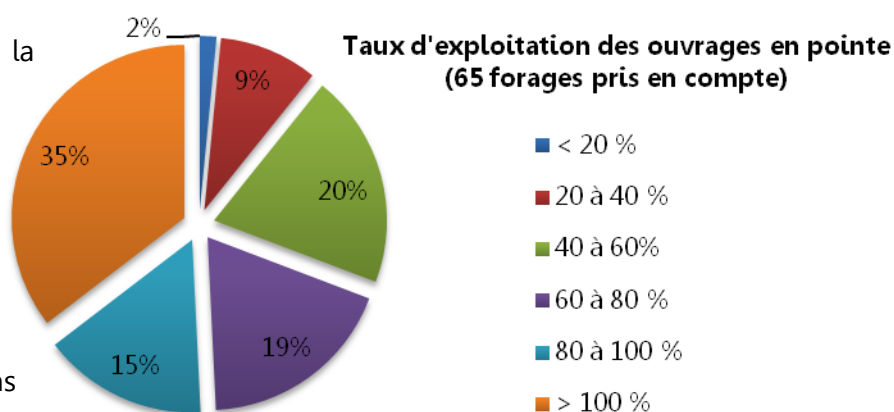
A noter que cette capacité théorique de production ne prend en compte que les capacités de la pompe et non les limites potentielles imposées par le génie civil, ni la disponibilité de la ressource.

En extrapolant à l'ensemble du parc cet exercice sur la base des 128 forages où le calcul est possible, on peut alors évaluer à 62 000 m³/j le potentiel de production moyen cumulé du parc de Matam. Le parc de forage fonctionne donc en moyenne à la moitié de ses capacités théoriques.

Sur 117 ouvrages, il devient alors possible de calculer un taux d'exploitation théorique moyen ². On note qu'environ ³/₄ des forages fonctionnent quotidiennement à moins de 80 % de leur capacité maximale. 13 % d'entre eux atteignent en revanche leur capacité théorique quotidiennement ; il s'agit généralement des forages équipés d'un groupe électrogène fonctionnant au-delà de la recommandation de 8h/j ainsi que de forages solaires du Dandé Mayo dont la production varie peu avec la saison mais qui ont atteint souvent leur limite au fil de l'augmentation de la demande avec le nombre de branchements.

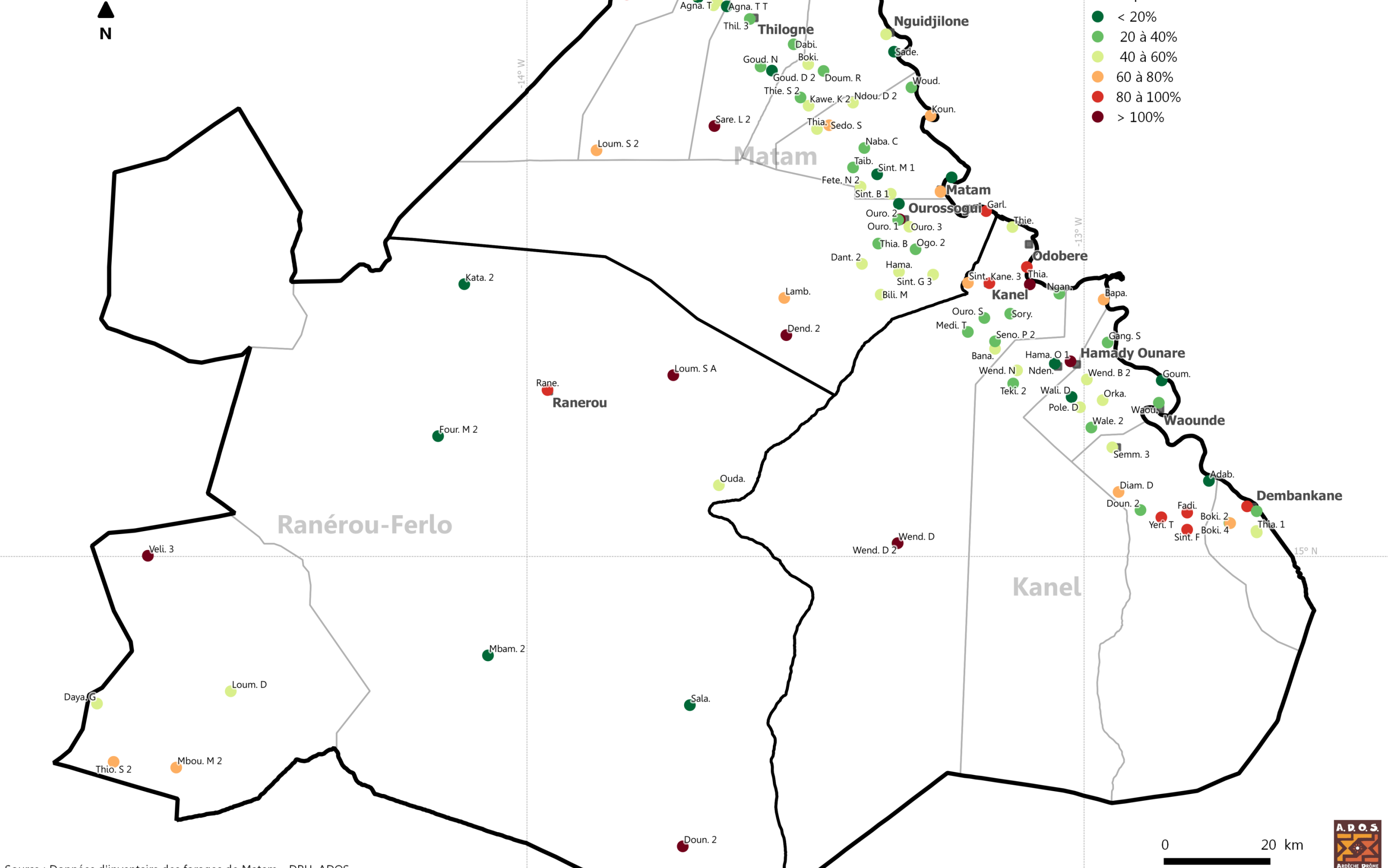


En reproduisant cet exercice sur la base des débits de pointe, sur les 65 forages le permettant (excluant notamment tous les forages solaires), on remarque que la moitié des captages touchent à leur limite les jours de forte demande. Cela met à nouveau bien en évidence les fortes variations inter-saisonnières de la demande sur certains sites, avec parfois un temps de pompage journalier moyen de seulement quelques heures, mais qui s'approche ou atteint le potentiel de production durant les mois les plus secs. La quasi-totalité des forages du Ferlo sont concernés, du fait de leur dimension pastorale.



² Taux (%) = Volume produit moyen journalier / Capacité théorique de production journalière

Taux moyen d'exploitation des forages de la région de Matam



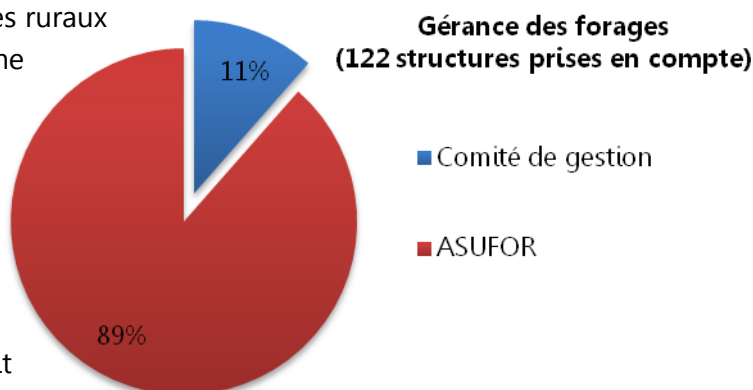
Source : Données d'inventaire des forages de Matam - DRH, ADOS



3.3.1. Mise en place des ASUFOR

En 1996, la réforme de la gestion des forages ruraux (REGEFOR) est venue créer l'ASUFOR comme instance de gérance des forages ruraux. L'ensemble des comités de gestion alors en place depuis les années 1980 aurait logiquement dû être progressivement remplacé par ces nouvelles structures.

Les enquêtes de terrain montrent qu'environ 11 % d'entre eux sont en fait restés sous l'ancienne forme, traduisant dans la majorité des cas une forme de refus du comité en place de confier la gestion de l'ouvrage à une assemblée d'élus. Parfois ces résistances concernent des forages financés par une association de migrants, que les populations remobilisent potentiellement en cas de panne ou de nouvel investissement. La création d'une ASUFOR impliquant de choisir des délégués résidents dans la localité, il n'est alors en principe pas possible à ces membres du village résidents à l'étrangers de se voir confier des responsabilités au sein de l'assemblée, ce qui entraîne parfois des situations de blocage.



Sur le terrain, ces comités sont rarement des exemples de bonne gestion des ouvrages. Leur positionnement les isole souvent et les contraint à gérer leur installation dans une quasi-autarcie, en se privant de l'appui technique de la Brigade des Puits et Forages notamment, et d'éventuelles réalisations de programme nationaux (branchement sociaux du PEPAM par exemple).

3.3.2. Tarification de l'eau

En région de Matam, la quasi-totalité des ASUFOR pratique la vente d'eau au volume ; la vente au forfait existe encore sur quelques très rares sites ne disposant pas de compteurs sur les branchements, ou ne disposant pas d'ouvrage de distribution destinés à la population (anciens forages pastoraux).

Le prix moyen pratiqué au niveau des branchements privés de la région est de 278 f/m³, et de 316 f/m³ aux bornes-fontaines (la différence correspondant à la rémunération du fontainier). Dans les cas de forages pastoraux on trouve généralement, parallèlement à une vente au volume pour la consommation domestique, une tarification au forfait journalier pour chaque tête de bétail (ovin, asin, caprin, etc.)

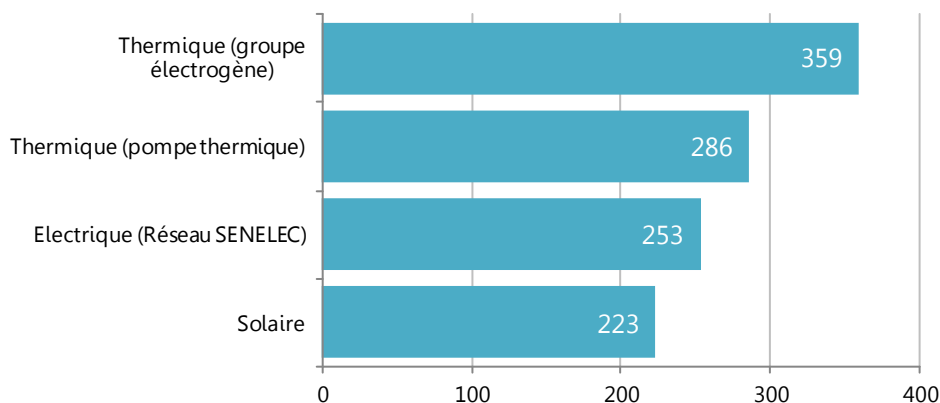
L'ensemble des recettes de l'ASUFOR provenant de la vente de l'eau doit permettre de couvrir la totalité de ses dépenses. A ce titre, les éléments déterminants du prix de l'eau sont généralement :

- L'énergie nécessaire à l'exhaure, qui varie en fonction de sa nature (thermique, électrique, solaire) et de l'accessibilité de la ressource (profondeur de la nappe captée).
- Les coûts d'entretien, maintenance et réparation légère des installations qui sont à la charge de l'ASUFOR
- Les coûts de déplacement d'équipe de dépannage en cas de d'intervention lourde ou de déplacements d'un technicien (BPF, entreprise privée sous contrat)

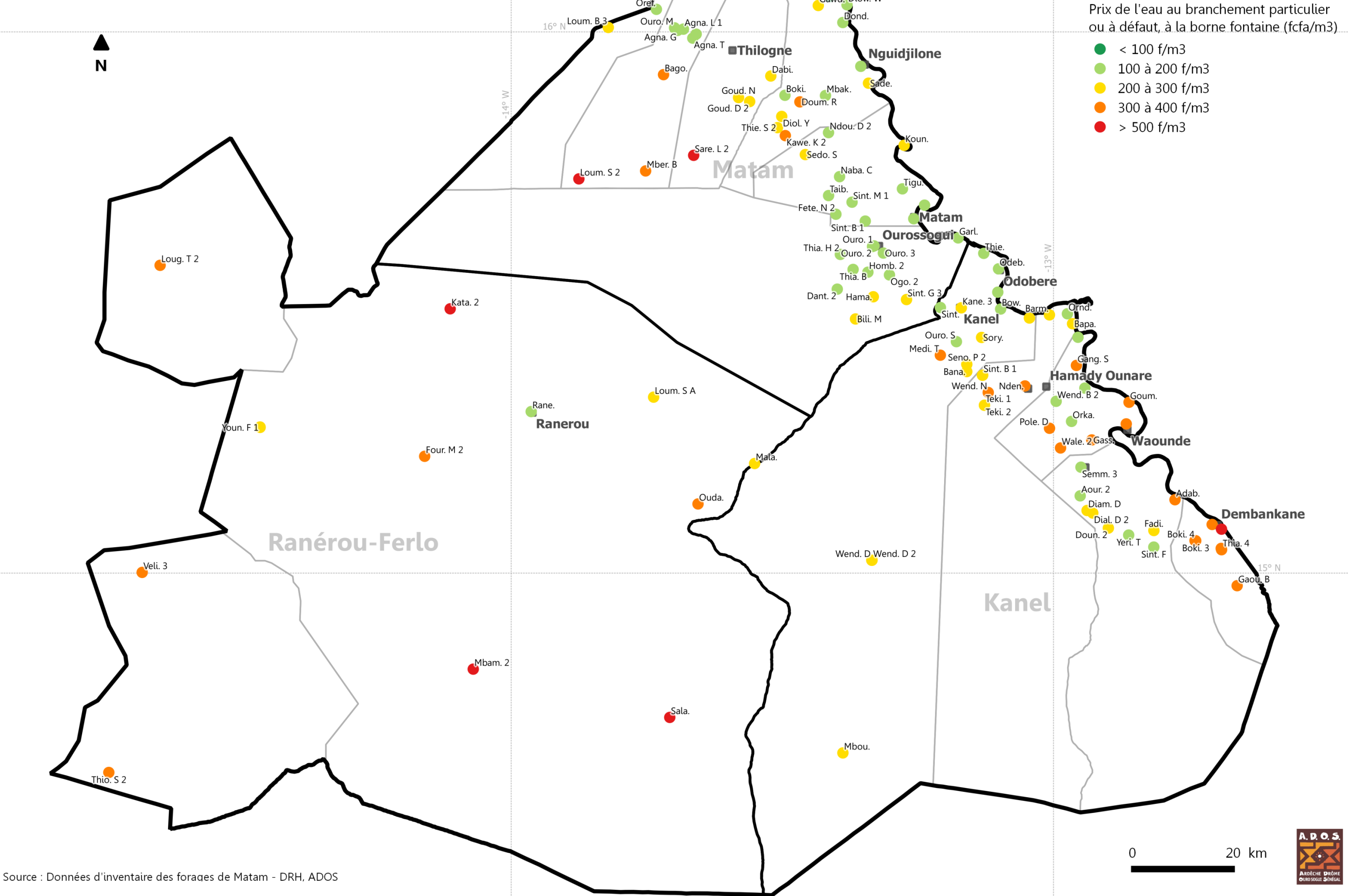
- Les coûts éventuels de contrat de maintenance qui touchent principalement les forages solaires (environ 200 000 f/an)
- Le personnel, qui se limite généralement à un conducteur, voire à un gardien, un releveur, et des fontainiers (rémunérés directement sur le volume vendu, souvent 50 f/m³). On notera aussi que de plus en plus d'ASUFOR ouvrent un bureau de recouvrement avec un caissier.
- Les remboursements de prêt et investissements
- Les éventuels renouvellements de réseau et provisionnement

A Matam, on observe un lien direct entre l'énergie utilisée pour l'exhaure, premier poste de dépense des ASUFOR, et le prix de l'eau payé par l'utilisateur. En toute logique les forages exploitant le thermique (groupe électrogène ou pompe à axe vertical) ont des coûts d'exploitation et donc des prix de vente plus élevés que la moyenne, avec 359 f/m³ (au branchement privé) pour les forages équipés d'un groupe électrogène. A titre de comparaison, le prix de vente moyen au niveau des forages raccordés au réseau SENELEC est de 253 f/m³, et de 223 f/m³ pour les forages solaires.

Prix de vente moyen de l'eau en fonction de l'énergie d'exhaure (124 forages pris en compte)



Prix de l'eau pratiqués au niveau des forages de la région de Matam



4. Suivi de la ressource en eau

Nous rappellerons tout d'abord que ce document n'a pas pour vocation d'analyser en détails l'hydrogéologie de la région de Matam. Cependant, dans la mesure où il présente l'ensemble des informations collectées sur les principaux captages de la région, certaines produites récemment, d'autres issues de rapports préexistants, il se doit de les reclasser, de les analyser et même de les exploiter dans un cadre hydrogéologique.

Dans un premier sous-chapitre 4.1, nous rappellerons des généralités sur les aquifères de la région de Matam, tirées de la documentation existante. Ces généralités permettront de tracer le cadre hydrogéologique de cette étude.

Puis nous essayerons de valoriser sous l'angle hydrogéologique les informations nouvelles recueillies dans le cadre des campagnes de terrain, complétées chaque fois que possible par les données existantes depuis la création des captages, concernant :

- l'extension et les caractéristiques hydrogéologiques des aquifères (sous-chapitre 4.2),
- les prélèvements (sous-chapitre 4.3),
- la piézométrie (sous-chapitre 4.4),
- la qualité des eaux (sous-chapitre 4.5) et le problème du fer (sous-chapitre 4.6).

4.1.1. Les aquifères de la région de Matam

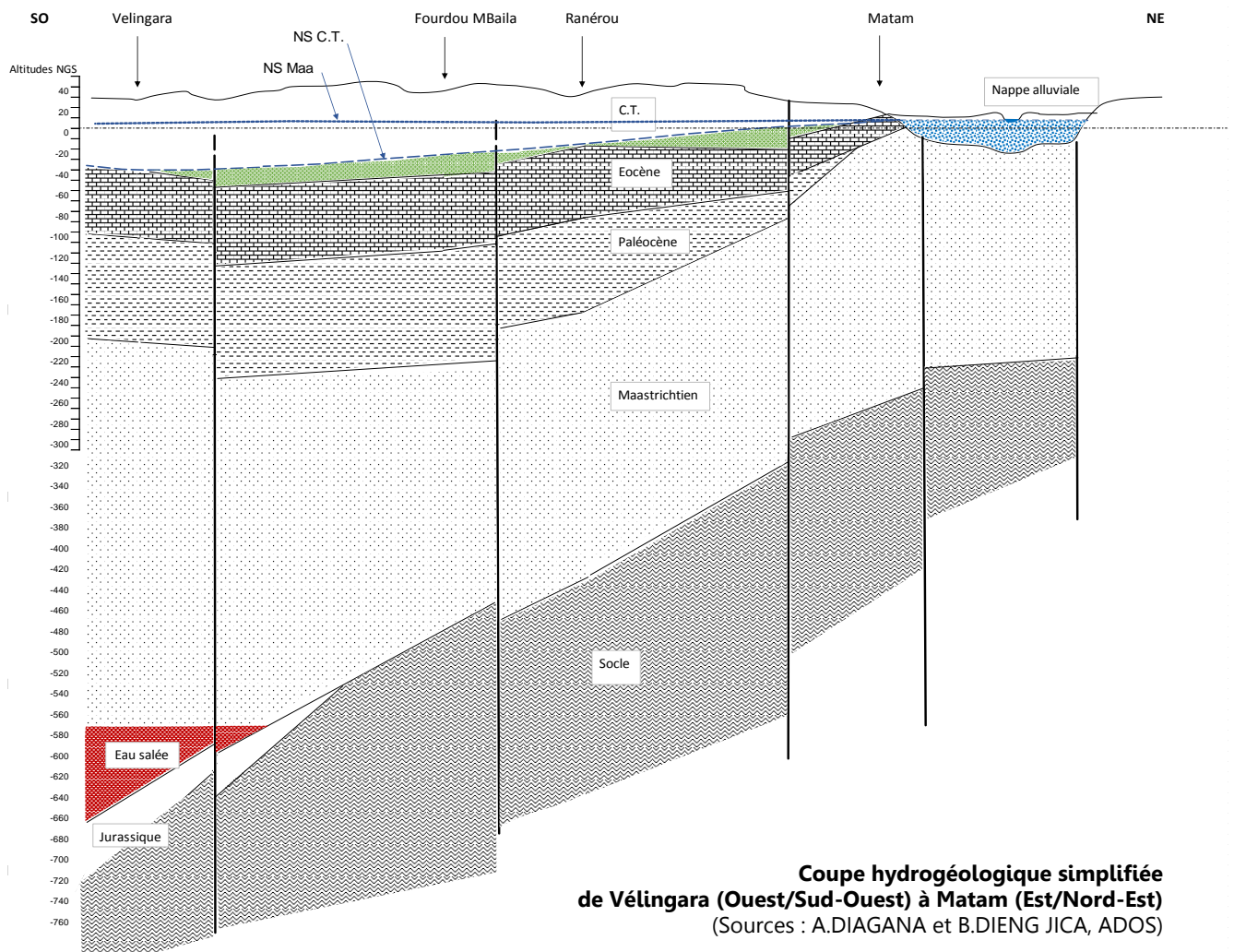
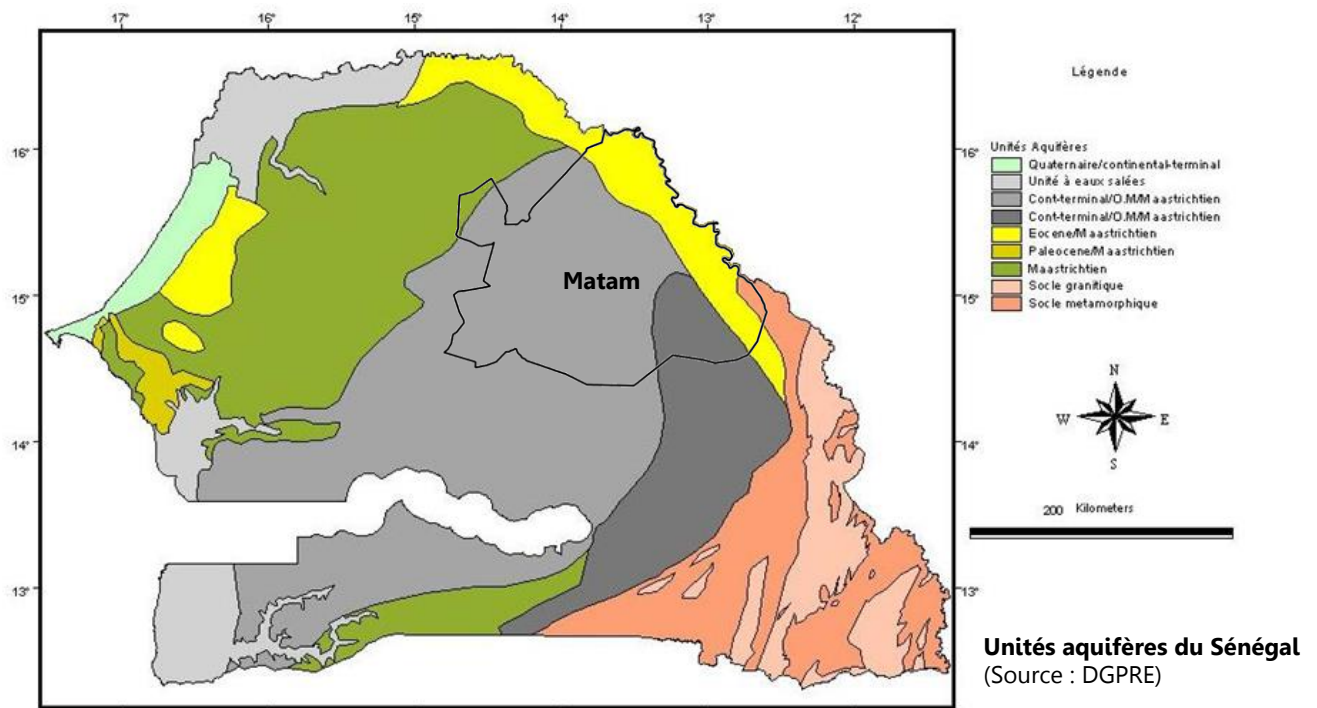
Les rappels ne concerneront que les principaux aquifères, qui font l'objet de captages mécaniques (par forage). On négligera donc les petites nappes perchées (nappes d'accompagnement d'oueds temporaires), d'extension locale, et exploitées exclusivement par des céanes ou des puits très superficiels.

Dans l'ordre stratigraphique, les principaux aquifères de la région de Matam qui font l'objet de captage par forage, ou sont utilisés par des systèmes d'adduction d'eau, sont les suivants :

- La nappe alluviale du fleuve Sénégal
- La nappe du Continental Terminal (CT)
- La nappe Eocène
- La nappe du Maastrichtien (et du Paléocène)
- Les nappes du socle

La coupe synthétique Sud-ouest/Nord-est suivante, basée sur l'interprétation libre d'un certain nombre de documents existants³, présente l'allure et les profondeurs des différentes formations géologiques (dont seule une partie est aquifère), ainsi que certaines limites importantes, comme celle de la limite orientale des eaux salées qui envahissent la base du Maastrichtien.

³ Thèse A.DIAGANA 1994 - Thèse B.DIENG, 1987 - Plan Directeur JICA, 2011



4.1.2. Nappe alluviale

Les alluvions du fleuve renferment une nappe dont l'extension est pratiquement limitée au Walo⁴, même si des formations alluviales peuvent coiffer le rebord du Diéri. En effet, ces formations diminuent rapidement d'épaisseur en s'enfonçant vers l'axe goudronné de la N2, et elles sont alors généralement sèches (la surface piézométrique se situant entre 10m et 30m de profondeur sous le Diéri).

Bien que captée par de nombreux puits, cette nappe d'accompagnement du fleuve est mal connue. En effet, elle n'a été étudiée que par quelques sondages de reconnaissance, et les puits creusés à la main ne fournissent généralement que des observations orales, qui ne sont pas retranscrites dans les rapports d'étude.

Par ailleurs, aucun des 176 forages dont l'attribution à un aquifère donné est renseignée n'est déclaré comme captant le quaternaire. Quant aux forages plus profonds qui la traversent, ils fournissent très peu d'informations sur sa nature.

Les alluvions quaternaires, d'une épaisseur moyenne de 15 à 35m semblent constituées assez généralement de deux couches :

- une couche supérieure à dominante argileuse ou argilo-sableuse
- une couche inférieure à dominante sableuse (sables fins et sables argileux, avec possibilité de bancs minces plus grossiers, voire graveleux)

Ces alluvions reposent sur un substratum accidenté, parce qu'affecté par de nombreuses failles. Ce substratum est constitué tantôt d'Eocène sous ses différents faciès (cf. 4.1.4), soit de Maastrichtien sur les zones hautes («dômes»), où l'Eocène s'est alors trouvé déblayé par l'érosion.

La nappe contenue dans la fraction saturée de ces alluvions, c'est-à-dire celle située en dessous de l'altitude de +8 m à l'amont (Semmé) et +4 m à l'aval (Thilogne) est en relation directe avec le fleuve dans son lit et celui des défluent les plus profonds. Avant la création du barrage de Manantali (au Mali, sur le Bafing, affluent principal du fleuve Sénégal), elle était alternativement alimentée par la crue et drainée à l'étiage. Aujourd'hui, avec le maintien d'une lame d'eau relativement haute et plus ou moins constante durant toute l'année dans le Fleuve, elle est à l'équilibre avec lui.

Les informations les plus précises proviennent d'une campagne d'essais réalisés entre 1986 et 1988 dans le cadre d'un projet OMVS/USAID⁵ sur une série de stations d'essais composées de piézomètres et de forages courts, captant tantôt le Quaternaire, tantôt l'Eocène ou le Maastrichtien sous-jacent, pour étudier les relations entre ces différentes nappes. Elles permettent d'établir le tableau suivant.

Hydrogéologie de la nappe alluviale (interprétation des coupes ORSTOM / USAID)

Profil transversal	Altitude TN (m NGS)	Altitude mur quat. (m NGS)	Substratum	Epaisseur saturée (m)	Epaisseur des sables aquifères (m)
P1 Semmé	+15 à +20	-25 à -35	Eocène / Maast.	15 à 24	10 à 22
P2 Kanel	+10 à +15	-18 à -24	Maastrichtien	25 à 30	18 à 25
P3 Nguilogne	+9 à +12	-18 à >-28	Eocène	22 à >32	15 à 25
P4 Thilogne	+9 à +12	-3 à -27	Eocène	7 à 31	5 à 25
P5 Saldé	+9 à +12	-10 à -22	Eocène	14 à 22	8 à 18

⁴ Sans rentrer dans le détail de la géomorphologie de la vallée, nous utiliserons les termes généraux « Walo » pour désigner les terres basses inondables de la vallée, « Diéri » pour désigner le rebord non inondable de celle-ci, et « Dandé Mayo » pour désigner le rebord en bourrelet qui sépare le Walo du Fleuve proprement dit, sur lequel sont situés de nombreux villages (généralement plus petits que ceux qui sont bâtis sur le Diéri et qui bénéficient de l'axe routier de la RN2).

⁵ Voir résultats dans la Thèse de A. DIAGANA, 1994

Des essais de pompage réalisés à différentes profondeurs (dans les alluvions comme dans le substratum)⁶ ont mis en évidence les bonnes relations qui existent entre ces formations. Il existe donc une probable alimentation par le fleuve, au travers de sa nappe d'accompagnement, des formations éocènes, et surtout maastrichtiennes, quand il y a continuité des formations sableuses, ce qui semble être le cas au moins dans deux dômes étroits situés sous le Walo, de Thilogne à Bokidiawe au nord, de Kanel à Semmé au sud.

Les valeurs de transmissivité déterminées par ces essais sur des niveaux sableux compris entre 20 et 30m de profondeur sont toutes élevées ($1 \text{ à } 3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$), mais il faut reconnaître que les alluvions bénéficient dans ce contexte de la continuité hydraulique avec les aquifères sous-jacents (Eocène ou Maastrichtien selon les stations d'essai). A. Diagana mentionne également, au forage F5 de Matam (prof. 27m), dans un contexte probablement moins favorable, une transmissivité encore honorable de $7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ au forage F1.

Qualité des eaux de la nappe alluviale

Il existe à priori très peu d'analyses permettant d'apprécier la qualité de l'eau de la nappe alluviale. Cependant, tout porte à croire que, contrairement aux secteurs de la basse-vallée et du delta, où la nappe alluviale est généralement salée à sur-salée (par évaporation et lessivage de sols salés), elle soit d'excellente qualité en région de Matam, grâce à ses relations avec le fleuve et à sa profondeur minimale de 5m qui la met à l'abri de l'évaporation. Un bon exemple semble apporté par les mesures périodiques de conductivité effectuées par la DGPRE dans le piézomètre GA 366 de Matam, avec des valeurs variant de 120 à 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

4.1.3.Continental Terminal

On regroupe sous ce terme un ensemble de dépôts détritiques d'âges allant du Mio-Pliocène au Quaternaire. Ces dépôts sont pour l'essentiel constitués de sables, souvent latéritiques, d'argiles sableuses et d'argiles.

D'abord pelliculaire sur le rebord du Diéri, le continental terminal (CT) augmente rapidement d'épaisseur en allant vers l'intérieur des terres, et atteint en moyenne une centaine de mètres dans le Ferlo. Cependant, il est dénoyé sur une bonne partie de sa hauteur, toute la zone du Ferlo étant affectée par une grande dépression piézométrique («nappe en creux»). Seule la base de la série est donc aquifère, sur une hauteur variant de zéro, sur le rebord du Diéri, à une quarantaine de mètres dans l'intérieur (cf. coupe simplifiée au 4.1.1).

L'épaisseur moyenne de la nappe serait de l'ordre d'une quarantaine de mètres, et l'épaisseur maximale serait atteinte à Loumbi (nord-Ferlo), avec 80 mètres⁷.

Ce phénomène de nappe en creux, s'écoulant depuis des bordures sud et est, plus ou moins réalimentées, vers une dépression centrale de nature inexplicée, a fait l'objet de plusieurs études⁸. Plusieurs hypothèses ont été émises pour expliquer le phénomène, mais jusqu'à présent il semble difficile de conclure :

- en régime stabilisé (permanent), il faudrait admettre qu'il existe, au centre de la dépression, des prélèvements (par pompage, évaporation et/ou drainance descendante) susceptibles d'équilibrer le flux d'écoulement depuis les bordures réalimentées

⁶ Essais de 48h sur des batteries forages/piézomètres crépinés à différentes profondeurs, réalisés par l'OMVS en 1987/88 et interprétés par A. Diagana dans sa thèse (1994).

⁷ Selon M.DIENE dans sa thèse (1985)

⁸ Thèse de B.DIENG (1987)

- en régime transitoire, la dépression générée par une montée du niveau sur les bordures d'origine eustatique (variation du niveau de la mer) ou climatique, serait en train de se combler. Ce comblement serait très lent à la suite de la faible transmissivité de l'aquifère, et de son caractère supposé de nappe libre.

Comme l'a bien analysé B. Dieng, le régime permanent est peu probable. Les hypothèses de prélèvement par évaporation) ou par drainance ne sont pas recevables : d'un côté la surface piézométrique est beaucoup trop profonde sous le sol pour que l'évaporation puisse y prélever, de l'autre, il est clair que le CT ne peut mathématiquement alimenter le Maastrichtien par drainance descendante, et reçoit de lui au contraire un apport par drainance ascendante : là où le niveau statique du CT est à -40m sous le niveau de la mer, celui de la nappe profonde est à +5m.

Quant aux prélèvements, leur volume total semble trop faible pour expliquer un tel rabattement. Ils ont été estimés en 1982 à 24 000 m³/j sur l'ensemble de l'extension de la nappe superficielle (régions de Louga, du fleuve et de Diourbel), couvrant quelques 78 000 km², ce qui représente seulement 3.6 l/s pour 1000 km². Même en admettant que le développement du pompage mécanisé puisse avoir multiplié ce chiffre par 10 depuis lors, on reste dans des ordres de grandeur trop faibles par rapport à cette dépression.

Les hypothèses relatives à un régime transitoire extrêmement lent, faisant suite à des variations du niveau marin et du climat pendant la dernière partie du Quaternaire, privilégiées par Dieng, semblent donc plus crédibles.

La nappe du CT a été captée par d'assez nombreux puits creusés à la main. Jusqu'à la découverte de la nappe profonde du Maastrichtien et le développement des moyens de forage, elle était la seule ressource disponible pour les populations du Ferlo, qui devaient parfois creuser très profondément (jusqu'à 90 m) pour l'atteindre. L'exploitation se faisait exclusivement à la main ou par traction animale. Aujourd'hui, avec le développement des forages et du pompage mécanique, le nombre de puits tend à se réduire.

D'après M. Diene, la nappe serait en tous cas affectée de fortes variations de niveau, pouvant atteindre 10 à 30 m dans certains puits. En fin de saison sèche, les puits accuseraient un rabattement important dû à l'effet cumulé des prélèvements dans une nappe à faible transmissivité ($5 \cdot 10^{-4}$ à 10^{-3} m²/s), puis remonteraient à l'hivernage par suite du délaissement des puisages, remplacés par une utilisation quasi exclusive des mares, marigots et céanes temporaires.

Sur la base de ce qui précède, on peut conclure que la nappe serait très peu rechargée. Sur sa bordure est, la position généralement perchée des formations du CT semble interdire, sauf peut-être localement à la faveur de compartiments abaissés, une alimentation à partir du fleuve ou de sa nappe alluviale. Toute la zone du nord Ferlo est d'autre part trop peu arrosée pour que l'on puisse envisager une alimentation actuelle par la surface. Seule la partie sud de la nappe, en dessous d'une ligne Ourosogui – Velingara - Linguère, pourrait recevoir localement, en année humide (quand les précipitations dépassent 400 à 450 mm), une infiltration efficace à partir des écoulements concentrés dans les lits fossiles du Ferlo et de son affluent, le Mboun.

Les quelques analyses de tritium réalisées dans les années 1980 à 1990 montrent toutes de très faibles activités, incompatibles avec une recharge actuelle, à l'exception d'une mesure à Thilé Boubacar, en région de Saint-Louis, à proximité du fleuve. Pour l'ensemble de la région de Matam en tous cas, il faut donc considérer les eaux du CT comme fossiles.

Les propriétés hydrodynamiques de l'aquifère sont décrites comme médiocres, avec des perméabilités plutôt faibles (de l'ordre de 10^{-5} à 10^{-4} m²/s), ce que semble confirmer l'importance des variations piézométriques annuelles. Les débits des captages seraient généralement faibles.

Qualité des eaux du Continental Terminal

La qualité des eaux du CT est excellente en région de Matam. Les eaux sont douces (résidus secs < 500 mg/l), de faciès généralement carbonaté calcique, sans problèmes particuliers. La documentation disponible ne souligne pas de concentration excessive en fluor, ni en fer.

En revanche, lorsque l'on remonte vers le nord-ouest, en région du fleuve, on note une forte augmentation de la concentration en chlorures, avec des résidus secs qui dépassent les 3 à 4 g/l vers le Lac de Guiers.

4.1.4. Eocène

L'Eocène est présent dans tout le bassin sédimentaire sénégal-mauritanien, excepté sur les dômes alignés sur l'axe de la vallée, où il a été déblayé par l'érosion. Il présente des faciès variés (sables argileux, parfois sables grossiers, marnocalcaires et calcarénites). Comme le Quaternaire alluvial, il est capté par de très nombreux puits mais reste également très mal connu au plan hydrogéologique. En effet, les puits ne s'enfoncent généralement que de 1 à 3 m dans l'aquifère, et n'apportent donc que des informations fragmentaires sur sa lithologie, son épaisseur et sa productivité.

Sous le Walo, dans les zones basses où il n'est pas érodé, l'Eocène semble constitué de sables ou grès, et est alors en continuité hydraulique avec les alluvions sableuses qui le recouvrent. Il est donc susceptible d'être rechargé si les pompages le dépriment. D'ailleurs, la nappe semble s'écouler depuis le Walo vers le Diéri.

Sous le Diéri, l'Eocène semble constitué majoritairement de calcaires et de marnes. Les niveaux calcaires peuvent être aquifères quand leurs conditions de gisement ne les portent pas au dessus de la surface piézométrique, comprise entre +6 et +12 m/NGS. L'épaisseur des calcaires aquifères peut aller ainsi de quelques mètres à 20-30 m.

En s'enfonçant vers le Ferlo, l'Eocène, bien que gagnant en épaisseur saturée (cf. coupe simplifiée), semble perdre ses propriétés aquifères. A l'est d'une ligne Mberla Bélé - Dendoudy - Wendou Diohi - Bokissaboudou, les coupes des sondages décrivent une série calcaire de 40 à 80 m d'épaisseur, mais dans laquelle les niveaux de calcaires francs se raréfient au profit de calcaires marneux ou de marnes. Il n'y a plus, dans le Ferlo, que deux aquifères, le CT au toit de l'Eocène, et le Maastrichtien (ou le Paléocène en continuité) en dessous, l'Eocène devenu imperméable isolant les deux réservoirs. Ceux-ci peuvent alors être considérés comme indépendants (ce qui n'empêche pas une alimentation éventuelle du CT par la nappe profonde par drainance ascendante).

Qualité des eaux de l'Eocène

Nous n'avons pas trouvé dans la documentation existante d'informations sur la qualité des eaux de l'Eocène en région de Matam.

4.1.5. Paléocène

Sous l'Eocène inférieur marneux, on trouve d'abord une série à dominante marneuse, attribuée au Paléocène, puis des calcaires relativement épais (200 à 300 m) à l'ouest du pays. Ces calcaires, souvent karstifiés, constituent un bon aquifère.

A l'est, en région de Matam, les formations calcaires sont toujours présentes mais moins épaisses (50 à 120m), et en allant vers l'est, de plus en plus intercalées d'argiles noires, de sables et de grès de faciès voisins de ceux du Maastrichtien sous-jacent. Les auteurs, à commencer par Audibert⁹,

⁹ Etude Hydrogéologique de la nappe Profonde du Sénégal, BRGM 1966

considèrent alors que ce Paléocène aquifère ne fait qu'un avec le Maastrichtien. Les quelques niveaux statiques mesurés indiquent d'ailleurs une concordance avec ceux du Maastrichtien, ce qui n'est pas le cas de ceux du CT.

Par ailleurs, aucun des rapports de forages inventoriés ne mentionne, quand l'information est disponible, le Paléocène comme couche captée (même si cela pourrait être le cas pour certains forages de profondeur comprise entre 50 et 100 mètres).

Qualité des eaux du Paléocène

Au plan de la qualité des eaux, la documentation existante ne nous renseigne pas sur une possible évolution en fonction de la profondeur, entre le haut du réservoir supposé Paléocène, et sa partie profonde maastrichtienne au sens strict. Nous considérerons donc qu'en région de Matam, le Paléocène constitue la partie supérieure du réservoir profond attribué au Maastrichtien, dont il ne peut être distingué.

4.1.6. Maastrichtien

Présente sur les deux tiers du territoire national, la nappe profonde du Maastrichtien constitue, de loin, la principale ressource en eau souterraine du pays. Elle a été découverte en 1938 à Kaolack lorsqu'il est devenu possible de forer à plus de 250 m de profondeur. De nombreux forages ont ensuite jalonné son extension sur toute la moitié nord du pays.

Artésienne, largement exploitée partout où elle n'est pas trop salée, elle fait malheureusement l'objet d'une surexploitation dans les régions occidentales du Sénégal.

Cette surexploitation se manifeste par une baisse notable des pressions, associée à une augmentation de la salinité. Ceci est dû au fait que la nappe d'eau douce flotte en fait sur une nappe d'eau salée, imprégnant toute la base du réservoir, et dont l'épaisseur croît rapidement en allant vers l'ouest. L'épaisseur de l'eau salée, qui imbibe le Maastrichtien inférieur et les séries plus anciennes sous-jacentes (crétacé moyen et inférieur, jurassique probable) est importante, comme cela a pu être observé au forage de Taïba (nord-est de Thiès) :

Résidus secs mesurés dans le Maastrichtien au forage de Taïba

Profondeur (m)	450	510	560	750	800
Résidu sec (g/l)	0.26	0.32	0.60	3.00	100.00

Dans les zones surexploitées, cette eau salée a alors tendance à remonter (comme un biseau salé marin) au fur et à mesure que la charge d'eau douce diminue. A l'est, et particulièrement en région de Matam, le biseau d'eau salée est absent, et l'ensemble de la formation argilo-sablo-gréseuse attribuée au Maastrichtien est imprégné d'eau douce. La limite de l'extension vers l'est de l'eau salée correspondait dans les années 1970 à une ligne nord-sud alignée sur Labgar – Diaguely – Vélingara – Ribo. Nous n'avons pas d'observations susceptibles de nous éclairer sur son possible déplacement ultérieur vers l'est.

L'épaisseur de l'aquifère en région de Matam semble comprise entre zéro en limite sud-est, où le Maastrichtien se biseaute sur la remontée du socle, et plus de 300 m dans la zone de Vélingara. Elle est en fait mal connue, parce que les forages s'enfoncent rarement de plus de 150 m dans la formation. Comme le montre de façon schématique la coupe simplifiée (cf. 4.1.1.), la formation est

affectée de failles, dont les principales délimitent la vallée du fleuve, mais certaines peuvent également effectuer de légers décrochements dans le Ferlo.

L'écoulement général de la nappe s'effectue, sous un très faible gradient, de la limite sud-est (bordure du socle, où les niveaux absolus atteignent +15 à +20 m) vers le nord-ouest (région du Lac de Guiers), où les cotes absolues deviennent négatives, et l'eau très salée. En région de Matam, les cotes absolues de 1963 allaient de +12 dans le coin sud-est (forages d'Ouro Mamoud et de Loumbi Sud) à +6m au nord (forages de Loumbi Saoudiara et Lougré Thioly).

Cette allure de l'écoulement suggère qu'il existait antérieurement une alimentation dans le sud-est du bassin, en bordure du socle, région mieux arrosée, ainsi qu'un ancien exutoire vers la côte atlantique. En réalité, les vitesses d'écoulement sont si faibles (une goutte d'eau infiltrée en bordure sud mettrait, d'après Audibert, trois millions d'années pour atteindre la côte...), qu'il vaut mieux considérer la nappe comme étant plus ou moins en équilibre statique.

Paramètres hydrodynamiques

Malgré le grand nombre de captages dans cette nappe, qui ont tous donné lieu à des essais de pompage (essai par paliers, suivi d'un essai de longue durée), il existe assez peu d'informations dans la littérature disponible sur les paramètres hydrodynamiques. En fait, seuls les essais anciens d'une part, qui concernent surtout les forages de la zone occidentale, et ceux réalisés par l'OMVS en 1987-1988 dans la vallée du fleuve d'autre part, semblent avoir fait l'objet d'interprétations détaillées.

Il faut par ailleurs souligner que seule la partie supérieure de la formation est captée, même si les captages ne concernent pas nécessairement les mêmes horizons aquifères. La partie profonde, à plus de 100 à 150 m sous le toit de la formation, ne l'a, à notre connaissance, jamais été. Cependant, les auteurs semblent s'accorder sur le fait que la perméabilité des sables diminuerait avec la profondeur.

Débit spécifique et transmissivité dans le Ferlo (B. Dieng)

Forage	N° IRH	Hauteur crépinée	Qs ¹⁰ (m ³ /h/m)	T (en 10 ⁻³ m ² /s)
(Vendou) Katane	07-6X-001	8	1	1.2
Loumbi	08-1X-001	18.6	4.3	4
Loumbol Amar	08-5X-002	9.6	4.5	3.6
Bokidiawe	06-2X-002	-	6.8	2
Ranch Doli	12-3X-006	16	12.7	20
Linguère	06-6X-001	19	25.8	27

Les débits spécifiques semblent croître d'est en ouest, passant de 1 m³/h/m à (Vendou) Katane à 26 m³/h/m à Linguère, les transmissivités suivant à peu près la même évolution.

Cependant, dans la vallée alluviale, les essais sur les stations de l'OMVS, concernant la partie sommitale du Maastrichtien (profondeur des captages limitée à 50 m) en contact avec les alluvions, donnent également des transmissivités élevées, comprises entre 1 et 2.5. 10⁻² m²/s.

Quant aux coefficients d'emmagasinement, les rares valeurs mentionnées sont de l'ordre de 10⁻⁴, ce qui est cohérent avec le caractère indéniablement captif de la formation.

Qualité des eaux du Maastrichtien

Les cartes anciennes du résidu sec montrent des eaux très peu minéralisées, avec des valeurs de l'ordre de 0.3 g/l sous le Diéri, tombant même à 0.2 g/l à Loumbol et Ranérou, puis ré-augmentant très légèrement vers l'ouest (Ouapa, Younouféré, 0.27 g/l), puis plus rapidement à partir de Barkedji (0.57 g/l), Velingara (0.63 g/l) et Linguère (0.73 g/l). Cette augmentation correspond essentiellement

¹⁰ Qs : Débit spécifique = débit / mètre de rabattement

à un enrichissement en ions Na⁺ et Cl⁻, qui deviennent prédominants dans la zone de présence des eaux salées à la base du réservoir.

Les mêmes études anciennes fournissent d'autre part de précieuses analyses physico-chimiques. Celles-ci mentionnent des valeurs de fer, probablement mesurées en laboratoire, après stabilisation des échantillons, et donc a priori fiables. Ces valeurs, malheureusement non commentées, sont souvent très élevées : 4.5 mg/l à Loumbol et Younouféré, 5.5 mg/l à Vélingara, jusqu'à 7.3 mg/l à Lougré Thioly et 11 mg/l à Ouro Mamoud.

Recharge actuelle

Les conditions d'une possible recharge de la nappe maastrichtienne ont fait l'objet de nombreuses études. Il semble maintenant admis qu'une recharge par les eaux du fleuve puisse exister, même dans les conditions de déficit pluviométrique des dernières décennies, et ce au moins dans les zones où le Maastrichtien, remonté par failles, se situe en position subaffleurante sous les alluvions, eux-mêmes en équilibre avec le fleuve.

Le point d'interrogation concerne la possibilité pour cette recharge de se propager vers l'intérieur, au fur et à mesure que la baisse des niveaux induite par l'exploitation se fera sentir.

4.1.7. Socle

On regroupe sous ce nom des formations anciennes sédimentaires (roches carbonatées ou siliceuses) d'âge Primaire, des formations métamorphiques (schistes, micaschistes, amphibolites), et des roches volcaniques (basaltes et granites) d'âges Cambriens et Précambriens. Ces formations n'affleurent pas en région de Matam, mais le font largement plus au sud, dans celle de Tambacounda.

Cependant, ces formations, qui sont présentes à de grandes profondeurs sous les couches crétacées (et jurassiques à l'ouest) remontent à la faveur de failles dans la partie sud-est de la région de Matam, et sont atteintes par quelques forages dans cette région limitrophe du département de Bakel. Seuls trois forages de la région de Matam¹¹ (Commune de Bokiladji) sont déclarés comme captant les formations du socle, à des profondeurs comprises entre 80 et 100 m, et avec des débits de 4-5 m³/h. On ne possède aucune information sur la nature des formations captées.

Plus au sud, dans le département de Bakel, d'assez nombreux forages captent, soit des couches d'altération du socle, soit des zones broyées au voisinage de failles.

¹¹ Thiagnaf F1, Thiagnaf F4 et Yacine Lacke F1

4.2. Éléments nouveaux sur les aquifères

4.2.1. Attributions stratigraphiques des intervalles captés

Sur les 233 points d'eau inventoriés, seuls 168 sont renseignés quant à l'attribution stratigraphique de l'aquifère qu'ils captent (72 %).

Cette attribution est généralement recopiée à partir des fiches-forages de la DRH, ou de la base de données PROGRES de la DGPPE, elle-même renseignée à partir des rapports de forages originaux. Quand cette information n'était pas disponible, des compléments ont été cherchés auprès d'autres sources : Répertoire des forages (DE, 1984), rapport JICA (2011), anciens rapports BRGM, etc.

Enfin, un certain nombre de compléments, et parfois des corrections, ont été apportés dans le cadre de la rédaction de ce document, sur la base d'éléments tels que la profondeur des niveaux captés, celle des niveaux statiques, la salinité des eaux, mais seulement quand ces éléments ont été jugés déterminants. Ces cas d'affectation ou de réaffectation sont généralement commentés dans ce chapitre.

4.2.2. Continental Terminal

Le tableau récapitulatif ci-après résume quelques principaux résultats des 8 forages inventoriés qui sont reportés dans la documentation existante comme captant le CT. Sont également inscrits sur le tableau 10 forages reportés comme captant le CT/Maastrichtien (c'est-à-dire soit l'un, soit l'autre aquifère, soit encore un mélange des deux), et un forage privé (Sinthiou G Mosquée n°1) captant a priori l'Eocène, le CT/Maastrichtien, ou éventuellement un mélange de ces aquifères.

Enfin, nous avons complété ce tableau avec 4 captages faisant partie du réseau de suivi piézométrique de la DGPPE et déclarés par elle comme captant le CT.

La connaissance que nous commençons à avoir des caractéristiques spécifiques des aquifères nous permet alors de confirmer ou d'infirmer l'ensemble de ces attributions :

- Si l'on considère les niveaux statiques, exprimés en valeur absolue en m/NGS, tous ceux qui se situent sous le zéro et sont localisés à l'intérieur du Ferlo, peuvent être confirmés comme captant le CT. Ainsi, le forage Loumbal Daka, captant de -103 à -108 m et de -116 à -132 m de profondeur, classé "CT /Maastrichtien", peut-il être affecté à coup sûr au CT compte tenu de son niveau statique à -19m (25m plus bas que celui du Maastrichtien). Pour les forages situés dans le Diéri ou le Dandé Mayo (Dolol), la coïncidence générale des niveaux entre les trois aquifères ne permet pas de trancher.
- Si l'on considère la conductivité, les valeurs supérieures à 700 microS/cm (ou 500 mg/l pour le résidu sec) plaident plutôt pour un rattachement à l'Eocène, plus salé (cf. 4.4.2.), au moins dans le secteur de Sinthiou Garba et Kanel.

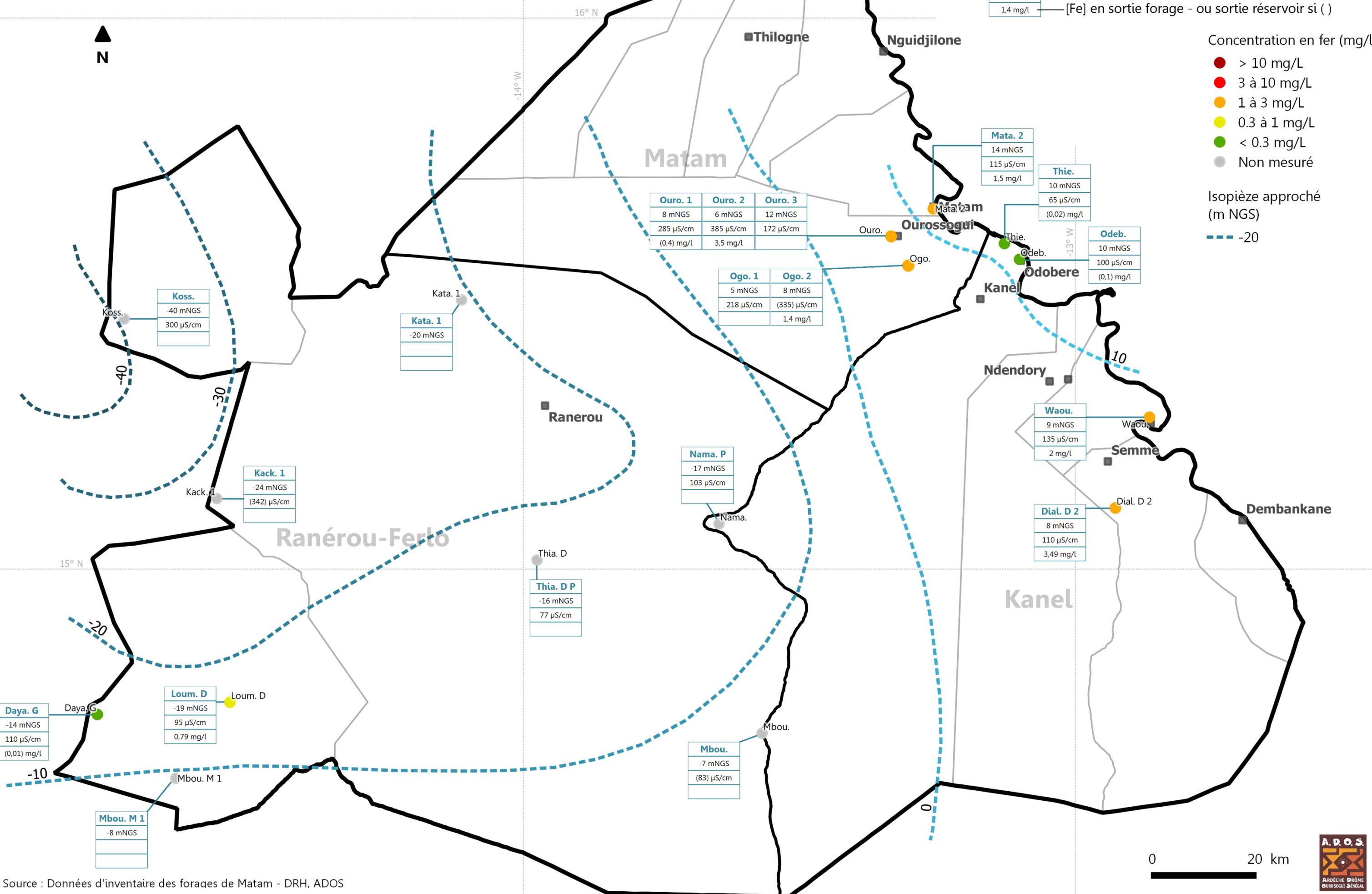
Profondeurs et horizons captés

La localisation des points d'eau inventoriés captant le CT est figurée sur la carte ci-après. Leur profondeur, (piézomètres DGPPE exclus) varie de -67 à -152 m, avec une moyenne de l'ordre de -90 m. Les intervalles captés vont de -43 à -132 m.

Caractéristiques principales des ouvrages attribués au Continental Terminal

Aquifère déclaré	Nom captage	N° invent	N° IRH	Commune	Z approx (m/NGS)	Prof (m)	Intervalle capté (m/TN)		Année réal.	NS (m/RP)		Débit (m3/h)		Conducti (ou RS)		Fer (mg/l)		Statut	Remarques	
							de	à		date 1 (essais)	date 2 (ADOS)	Z NS approx m/NGS	Installé	mesuré	date 1 (essais)	date 2 (ADOS)	date 1 (ADOS)			date 2 Prélèvt
CT	Dayanne Guelode	84		Velingara	55	131	-103	-126	2011	-68.58		-14	34	62 (RS)	110	0,01	SR	Exploité		
	Dialoube Diamouguel	88	09-7X-0011	Aouré	41	71	-43	-63	1993	-32.55		8	46	80 (RS)	110		3,49	SF	Exploité	
	Kack F1	123		Oudalaye	46	96	-91	-96	2006	-70.05	-69.35	-24		222 (RS)		0,48	SF	Abandonné (vs)		
	Kanel F1	124	08-6X-0001	Wouro Sidi	31	76	-55	-67	1967	-18,74		12		768 (C)		0,4		Non équipé	La conductivité plaide pour l'Éocène, et non le CT; Q aux essais 20 à 40	
	Mboung	144	14-2X-0002	Wouro Sidi	47	85	-59	-82	1985	-53,85		-7		54 (RS)		0		Abandonné		
	Ogo F1	152	08-6X-0007	Ogo	19	84	-58	-79	1978	-13,8		5		218 (C)				Abandonné (vs)		
	Katane F1	128	07-6X-0001	Oudalaye	56	79					-75,52	-20						Abandonné	FP, forage bouché, puits encore +- fonctionnel	
	Mboundoum Baba P1	224a		Velingara	58	67,5	-65	-67	±1990		-66,4	-8						Abandonné	Ancien CP au Maast, approfondi après tarissement du forage et du CP	
	Dolol	96		Wouro Sidi	24	83	-62	-76	2007	-7,99		16			90	0,14	SF	Exploité	Capterait plutôt le Maast	
	Loumbal Daka	136		Velingara	58	152	-103	-132	2011	-77,31		-19	33,6	98 (RS)	95	0,35	0,79	SF	Exploité	Captage CT confirmé par le NS
CT / Maa	Matam F2	22	08-6X-0036	Matam	21	83	-45	-77	1998	-7,45	-9,4	14	44	30	115	0,35	1,5	SF	Exploité	
	Odobere	2	08-6X-0026	Wouro Sidi	19	75	-54	-69	1991	-8,75	-5,65	10	65		100 (RS)	0,1	0,1	?	Exploité	
	Ogo F2		08-6X-0116	Ogo	22	95	-67	91	2007	-13,6		8		200 (RS)	0,6	1,38	SF	Exploité		
	Ourosogui Hôpital	156	08-6X-0002	Ourosogui	28	80	-60	-77	1967	-16,25		12		172 (C)		0,7		Abandonné		
	Ourosogui F1	23	08-6X-0003	Ourosogui	28	91	-60	-85	1996	-20,1		8	35		235		0,4	SR	Exploité	
	Ourosogui F2	41	08-6X-0019	Ourosogui	28	96	-68	-92	2008	-21,53		6	46	405 (C)	385	0,87	3,5	SF	Exploité	
	Thiemping	3		Wouro Sidi	20	91	-50	-80	1998	-10,13	-8,1	10	50		65		0,02	?	Exploité	
	Waoundé	1		Waoundé	18	67	-41	-46	1998	-8,6	-6,11	9		150 (C)	135	0,1	2,04	SF		
	Sinhiou Garba Mosquée F2	11		Ogo	38	90?			2011	-25		13		1070		0,04	SF	Exploité (privé)	Capterait plutôt l'Éocène d'après sa conductivité	
	Namary puits			Wouro Sidi	40						-56,55	-17		73	103					
Piézo DGPPE	Kossas			Lougre Thioli	42						-81,60	-40		564	295			notés CT ou puits CT par DGPPE		
	Tiango Dendoudy puits			Oudalaye	45						-60,71	-16		77						
	Koré (Karé) Kabi		14-1X-0002 ?	Oudalaye	61							-47,33	14		455	423			Noté Maast avec prof 445m dans PROGRES	

Résultats de l'inventaire relatifs à l'aquifère Continental Terminal



Source : Données d'inventaire des forages de Matam - DRH, ADOS



Débits

Les débits des forages équipés varient de 16 à 65 m³/h, avec une moyenne de 40 m³/h. Ces valeurs sont supérieures à celles auxquelles on pouvait s'attendre, si l'on se réfère aux caractéristiques hydrodynamiques plutôt médiocres qui ont été décrites au chapitre 4.1.2.

Les éléments nouveaux recueillis concernant les volumes exploités, la piézométrie et la qualité de l'eau seront présentés respectivement aux chapitres 4.3., 4.4 et, 4.5.

4.2.3.Eocène

Six forages inventoriés sont déclarés captant l'Eocène. Ils sont tous situés sur le rebord du Diéri (à l'exception du forage de Doundou, sur le Dandé Mayo), et leur profondeur varie entre -35 et -80 m. Nous leur ajouterons trois puits utilisés pour l'adduction d'eau potable (Agnam Lidoubé P1 et P2, et Sinthiou Garba Mosquée) et un puits d'irrigation (Sinthiou Garba), ainsi que le forage privé Sinthiou Garba Mosquée F2, sur lequel nous avons très peu d'informations, mais que la salinité rattacherait plutôt à l'Eocène. Les principaux renseignements concernant ces captages sont rassemblés sur le tableau suivant.

On notera que d'assez nombreux puits situés en rebord du Diéri, qui étaient traditionnellement utilisés pour l'eau potable et le pastoralisme, ont tendance à être délaissés dans les villages dotés d'un forage. En revanche, quelques nouveaux puits et petits forages sont réalisés pour des alimentations privées (entre Kanel et Orkadiéré, notamment forages Sinthiou Garba Mosquée) ou des petits jardins collectifs (Sinthiou Garba, Agnam Lidoubé, Amadi Ounaré). Les débits des forages supposés capter l'Eocène varient entre 5 et 45 m³/h. Ceux des puits, limités par des profondeurs de pénétration faibles (1 à 4m) sont nettement inférieurs (quelques m³/h), encore que les puits d'eau potable d'Agnam Lidoubé soient déclarés dotés de bons débits (malheureusement non vérifiés).

Caractéristiques principales des ouvrages attribués à l'Eocène

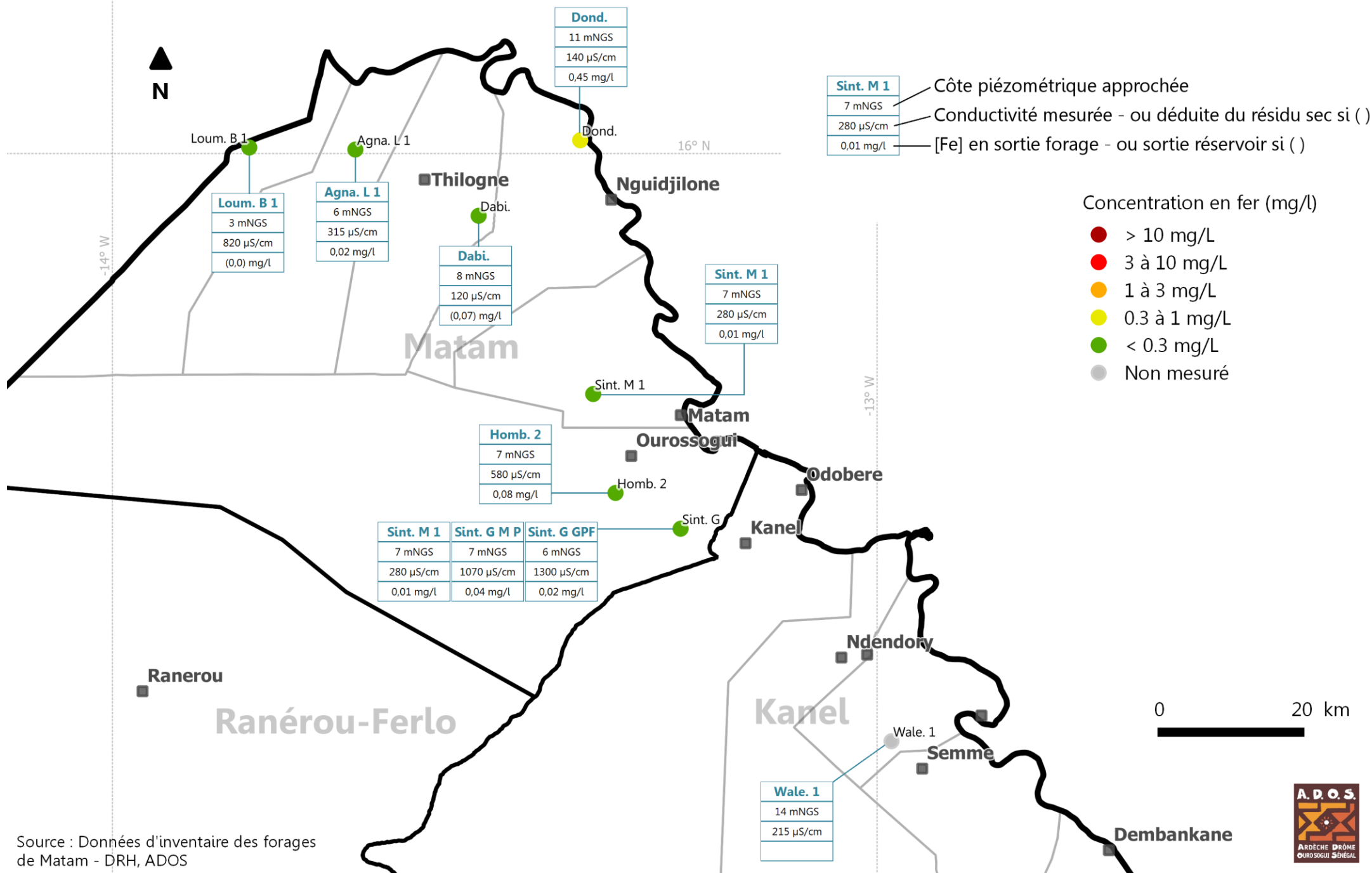
Nom	N° Inventaire	Alt. approx	Profondeur captée / sol	NS/sol m	Alt approx NS (m)	Débit exploit. m ³ /h	Cond µS/cm	Fe mg/l
Dabia	51	+ 21	45 - 69	-13	+ 8	45	120	0.07
Doundou	97	+ 29	36 - 56	-7	+ 11	26	50 - 140	0.45
Hombo F2	122	+ 41	18 - 33	-18	+ 7	5 - 10	580	0.08
Loumbol Baladji	217	+ 48	61 - 78	-37	+ 3	? (1)	820	0 ?
Sinthiou Mogo F1	26	?	37 - 41	-14	+ 7	12,5 (>20)	280	0.01
Walel F1	191	+ 50	40 - 52	-31	+ 14	? (2)	215	
Sinthiou Garba Mosquée F2	11	+ 38	60 - 80	-	-	-	1070	0.04
Sinthiou Garba Mosquée P1	17	+ 30.9	24 - 26	-24	+ 7	2-3 ?	1070	0.04
Sinthiou Garba GPF	-	+ 33	27 - 32	-26	+ 6	10-15 m ³ /j	1300	0.02
Agnam Lidoubé P1 - P2	15	+ 30	11 - 17	-11	+ 6	5-15 ?	315	0.02

1 Abandonné après 4 ans de production suite à une venue de sable

2 Capacité trop faible devant les besoins, pompe à main ou petite pompe pour utilisation en maraîchage envisageables

L'ensemble des informations collectées sur les puits et forages captant l'Eocène est rassemblé sur la ci-après. Les éléments nouveaux recueillis concernant les volumes exploités, la piézométrie et la qualité de l'eau seront présentés respectivement aux chapitres 4.3, 4.4, et 4.5.

Résultats de l'inventaire relatifs à l'aquifère Eocène



4.2.4. Maastrichtien

Le Maastrichtien constitue de loin l'aquifère le plus capté en région de Matam. Le nombre de forages inventoriés déclarés comme le captant est de 142, auxquels on peut ajouter les 7 forages attribués au CT/Maastrichtien, soit 149 forages sur les 168 dont l'affectation à un aquifère est renseignée (89 %).

Profondeurs et horizons captés

La profondeur des forages attribués au Maastrichtien va de -45 m (Fadiar) à -514 m (Dounoubel F1), avec une moyenne de 194 m. Les profondeurs minimales sont celles des forages du Dandé Mayo, qui captent généralement -25 à -50m de sables immédiatement situés sous les alluvions du Fleuve, tandis que les profondeurs maximales se situent vers l'Est / Sud-Est de la région.

La figure ci-après montre la profondeur des crépines des forages. On voit que seuls 5 forages captent en dessous de -400 m. Une quarantaine de forages captent entre -200 et -400 m de profondeur, tandis que la grosse majorité captent des niveaux situés entre -50 et -200 m de profondeur. Ceci découle tout simplement du fait que la densité des ouvrages, en particulier ceux de création récente, est beaucoup plus forte dans le Diéri et le Dandé Mayo que dans l'intérieur du Ferlo.

Débits

Les informations relatives au débit des ouvrages sont relativement lacunaires. On comptabilise seulement une soixantaine d'ouvrages avec des informations sur leur débit actuel (débit de la pompe installée), et environ 80 avec des données relatives à leurs essais d'origine.

Parmi les informations disponibles, nous avons sélectionné ou calculé :

- le débit inventorié, c'est-à-dire celui de la pompe en place, mesuré à chaque fois qu'il existait un compteur en état de fonctionnement, ou sinon évalué en fonction du temps de remplissage du réservoir fourni par le conducteur
- le débit de pointe des essais (4ème palier en général), ou en l'absence de résultats de l'essai par paliers, celui de l'essai de longue durée
- le débit spécifique correspondant, quotient de ce débit par le rabattement correspondant.

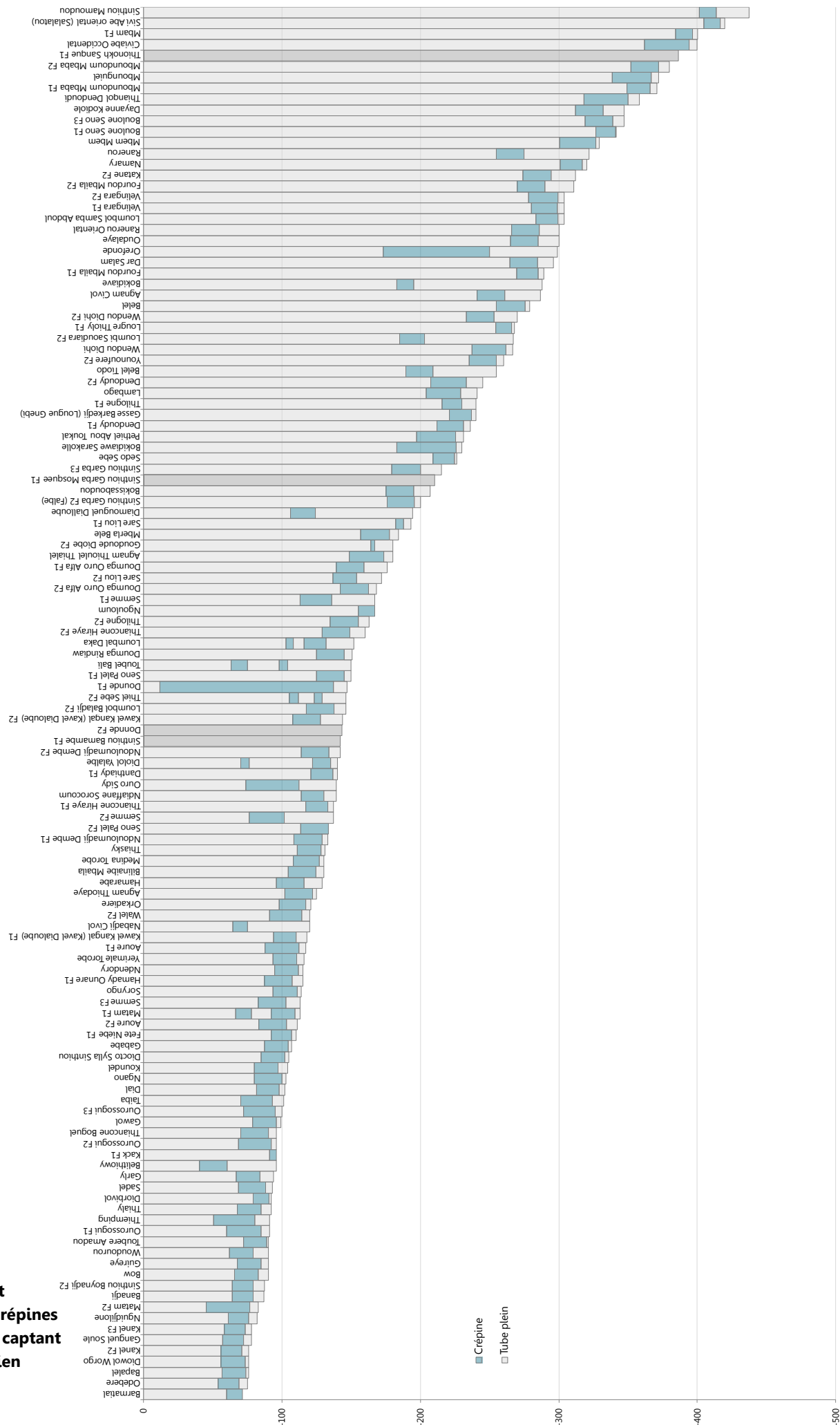
Comme on le sait, le débit spécifique est un bon indicateur de la productivité d'un captage, même si les valeurs calculées ici sont biaisées par un certain nombre de facteurs : durée variable des paliers, influence des paliers précédents lorsque ceux-ci sont enchaînés, etc.

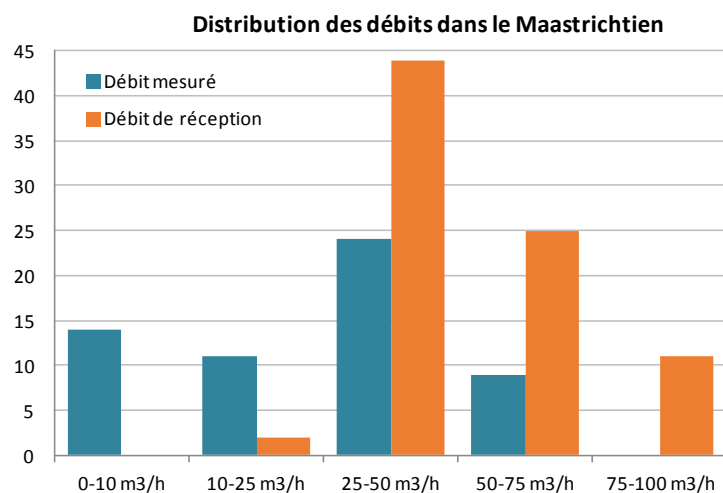
Le débit spécifique fournit également une idée de la productivité de l'aquifère (ou de l'intervalle capté), même s'il dépend aussi d'autres facteurs liés aux captages eux-mêmes : hauteur crépinée, diamètre et type de crépine, état du développement, etc.

L'histogramme suivant compare les débits inventoriés aux débits de réception (c'est-à-dire les débits maximums préconisés à l'issue des essais de pompage). On voit que les premiers se situent assez nettement plus bas, avec une moyenne de 30 m³/h, alors que la moyenne des débits de pointe se situe à 53 m³/h. Ceci provient d'une part du fait qu'un certain nombre de captages sont des forages solaires, dont l'équipement en pompes (calé sur les besoins et non sur les potentialités des ouvrages) dépasse rarement 10 m³/h, d'autre part de ce que les pompes installées respectent toujours une marge de sécurité par rapport au potentiel des captages, ce qui doit rester une règle.

Profondeur et intervalles crépinés des forages captant le Maastrichtien

Profondeur et niveaux des crépines des ouvrages captant le Maastrichtien





	Débit mesuré	Débit de réception	Débit spécifique
Min	5.1	16.4	0.6
Max	65	107	27.2
Moyen	30.3	53.1	8.4

On notera que 4 forages ont dépassé 90 m³/h aux essais.

D'autre part, une vingtaine des forages testés (25 %) ont fourni aux essais un débit spécifique atteignant ou dépassant 15 m³/h/m. On peut en déduire que, à l'augmentation des pertes de charge près, un rabattement de 5 à 10 mètres sur ces forages produirait un débit potentiel de 75 à 150 m³/h.

4.3. Prélèvements

4.3.1. Prélèvements actuels

4.3.1.1. Approche des prélèvements totaux par évaluation des besoins

Le chapitre 3.2.1 a exposé l'approche suivie pour tenter de reconstituer les prélèvements actuels à partir des relevés de consommation (ou des déclarations sur les durées de pompage) collectés par l'inventaire. On a vu que cette approche devait dans un certain nombre de cas, faire appel à des approximations ou des extrapolations, et restait donc grossière.

Il va être maintenant tenté de la confronter avec celle qui résulte d'une évaluation des besoins par simple application de doses unitaires aux données de population (pour l'AEP), de cheptel (pour les besoins pastoraux), et de superficie irriguée pour l'irrigation. Dans un premier temps, on peut tenter une approche globale. Pour cela, on appliquera :

- pour l'eau potable, une dose moyenne de 27 l/j/hab à la population totale de la région (562 500 hab au recensement 2013), soit 15 200 m³/j (5.55 Mm³/an).
- pour le bétail, une dose moyenne de 33 l/j/UBT (correspondant à 40 l/j pendant 300 j/an, les 65 jours restants étant supposés couverts, pendant et après l'hivernage, par l'abreuvement dans les marigots et mares) aux 606 000 UBT totaux (voir détail du calcul au chapitre suivant), soit 20 000 m³/j (7.3 Mm³/an)
- pour l'irrigation, une dose moyenne de 15 000 m³/an/ha qui, appliquée aux 130 Ha irrigués totaux fournit un volume annuel de l'ordre de 2 Mm³/an.

On obtient ainsi un total de 14.8 Mm³/an, supérieur de 8 % aux 13.7 Mm³/an calculés à partir des prélèvements inventoriés sur 164 forages (cf. 4.3.2.1.). Le décalage entre les deux approches illustre leur degré d'imprécision, mais semble tout-à-fait acceptable. On envisagera notamment que la consommation du bétail puisse être surestimée dans l'approche ci-dessus, le même bétail pouvant être partiellement décompté dans plusieurs UGB voisines.

4.3.1.2. Evaluation des besoins par Commune

Il est devenu rapidement évident qu'une approche à l'échelle du captage n'était pas possible : les données de population raccordée, et surtout de fréquentation du bétail collectées auprès des ASUFOR lors des visites sont beaucoup trop fragmentaires et imprécises. Ainsi, sur les rares forages où l'on a pu d'une part collecter des données de population raccordée, de fréquentation du bétail, de superficie irriguée si c'est le cas, et d'autre part d'obtenir une estimation jugée correcte de la production moyenne, il n'existe aucune concordance, ou alors celle-ci semble fortuite. On s'est donc attaché à établir une ventilation des besoins théoriques sur une base communale. Les résultats sont exposés sur le tableau ci-après.

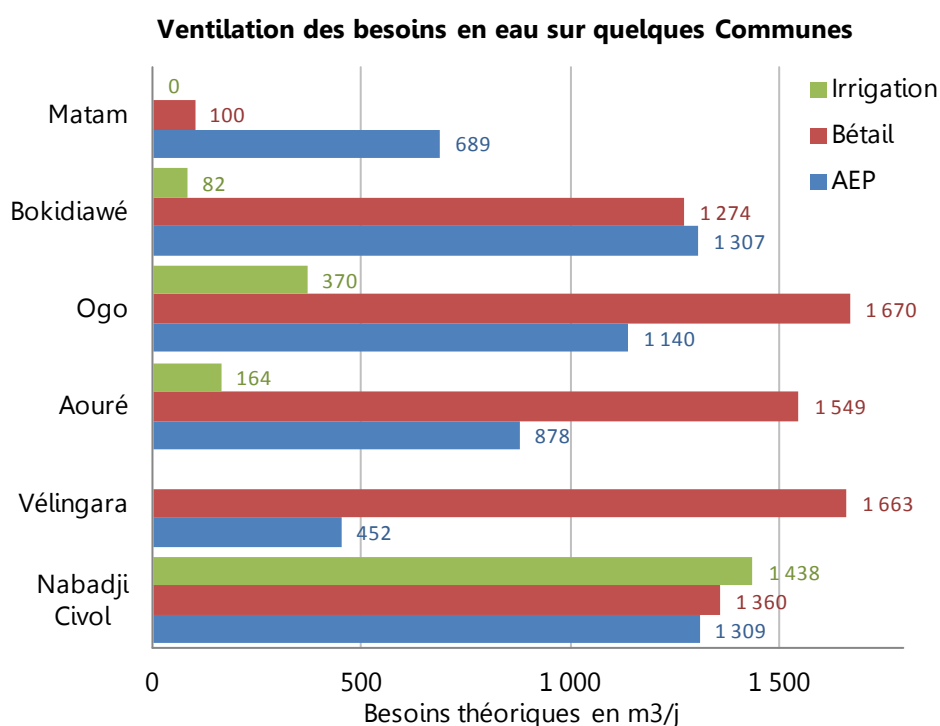
- Besoins de l'AEP : Avec le dernier recensement, l'on dispose de données fiables de population, auxquelles on peut appliquer des doses unitaires variables, allant de 50 l/j/hab pour Matam à 30 l/j/hab pour les autres villes (40 l/j pour Ourossogui), et à 25 l/j/hab pour les communes rurales. Ces doses sont appliquées aux populations correspondantes.
- Besoins du bétail : ceux-ci peuvent être évalués en appliquant la dose théorique de 33 l/j/UBT (40 l/j sur 300 j/an). Le nombre d'UBT par commune est calculé à partir des données détaillées

de cheptel fournies dans « Situation Economique et Sociale Régionale – ANSD / SRSD Matam - 2013 »¹² (cf. Annexe 4 | Reconstitution du nombre d'UBT).

- Besoins de l'irrigation : ils sont évalués en appliquant une dose moyenne de 15 000 m³/ha/an (41 m³/j moyen) à la somme des superficies irriguées déclarées dans l'inventaire pour chaque commune.

Sur cette base, le premier résultat frappant est qu'avec 50 % du total (contre seulement 37 % pour l'AEP), les besoins du bétail viennent en tête ; le besoin actuel de l'irrigation (il s'agit bien entendu uniquement des jardins irrigués ou petits périmètre sur forages) ne représente que 13 % des besoins actuels totaux. Cette répartition moyenne recouvre en fait des fortes variations dans l'espace : dans le Ferlo, les besoins du bétail dominent largement (93 % du total à Lougre Thioly, 79 % à Velingara), tandis que dans le Diéri ils ne dépassent pas 30 %, et dans le Dandé Mayo probablement 10 à 15 % du total¹³ ; l'AEP domine donc largement dans le Ferlo et le Dandé Mayo (60 à 70 % du total dans les communes rurales, jusqu'à 87 % dans les communes urbaines ; enfin l'irrigation, généralement peu importante (0 à 20 % du total) devient exceptionnellement importante dans deux communes, Sinthiou Bamambe (45 %) et Nabadji Civol (35 %) où existent de véritables périmètres irrigués par forage.

Le graph ci-dessous illustre ces variations par quelques exemples : prépondérance de l'AEP dans les communes urbaines (Matam), équivalence entre AEP et bétail pour les Communes axées sur les zones Diéri-Dandé Mayo, prépondérance des besoins du bétail dans le Ferlo (Velingara), et enfin exemple de Commune avec une forte composante d'irrigation (Nabadji Civol).



Pour les anciennes communautés rurales (les seules communes dont on connait la superficie), il devient possible de calculer un indicateur précieux : la « densité de besoin », quotient du besoin total de la Commune par sa superficie. Cet indicateur est assimilable, dans la mesure où l'on observe une

¹² Le calcul des UBT (Unité de Bétail Tropical) s'effectue en pondérant les têtes de bétail par les paramètres classiques suivants : Bovins = 1 UBT ; ovins + caprins = 0.2 UBT ; équins = 1.1 UBT ; asins = 0.5 UBT ; camelins = 1.2 UBT. Le nombre total d'UBT ainsi obtenu peut s'avérer très différent de celui fourni dans les PLHA, par ex pour la CR d'Oudalaye 95 300 selon le SRSD 2013, contre 299 400 selon le PLHA (d'après le PLD 2002). Nous retiendrons a priori les chiffres du SRSD, plus complets et plus récents.

¹³ En fait, le découpage administratif rend difficile cette évaluation, la plupart des CR comportant à la fois une part de Diéri, une de Dandé Mayo, et un arrière-pays incluant une part plus ou moins importante de Ferlo.

bonne cohérence entre cette approche théorique des besoins totaux et celle des consommations totales sur la base des productions unitaires des forages, à la « pression de prélèvement actuel », indicateur classique en matière de gestion des eaux.

Cet indicateur permet en effet d'évaluer comment les prélèvements actuels se répartissent sur la surface d'extension des ressources en eau, et de les comparer avec leurs effets sur ces ressources, notamment en matière d'évolution des niveaux. On constate ici que cette « densité » ou « pression » :

- varie de 3 à 7 m³/j/km² dans les communes à relativement forte densité de population du Diéri et du Dandé Mayo (maximum 7.5 m³/j/km² pour la Commune de Nabadji Civol dépourvue d'extension vers le Ferlo)
- atteint et dépasse probablement 10 m³/j/km² dans les communes urbaines
- tend vers 1, voire en dessous pour les communes du Diéri qui possèdent une large extension dans le Ferlo
- est minimale dans les communes du Ferlo proprement dit (département de Ranérou), avec seulement 0.37 m³/j/km² pour la Commune d'Oudalaye.

On voit ainsi que, schématiquement, la pression de prélèvement est 10 fois plus faible dans l'intérieur du Ferlo qu'elle ne l'est dans les zones plus peuplées du Diéri et du Dandé Mayo. Ce fait est très important dans la mesure où les fortes pressions de prélèvement s'effectuent dans la région où les ressources en eau souterraines peuvent bénéficier d'une recharge, au moins partielle, et où aucune baisse du niveau ne semble jusqu'à présent se manifester. En revanche, la pression des prélèvements actuels, bien que comparativement faible, est suffisante pour engendrer la baisse des niveaux caractérisée au chapitre 4.4 suivant.

Évaluation des besoins en eau par commune et par usage

Commune			AEP		Bétail			Irrigation		Besoins totaux m³/j	"Densité de besoin" m³/j/km²
Nom	Superficie km²	Population 2013	Dose l/j/ha b	Conso 2013 m³/j	UBT (1)	Ratio UBT/pop	Conso m³/j à 40l/j/UGB (2)	Ha irrig	Conso m³/j à 15000 m³/an/H a		
Aouré	1 695	35136	25	878	46 938	1,34	1 549	4	164	2 592	1,53
Bokiladji	572	30447	25	761	31 500	1,03	1 040	-		1 801	3,15
Dembancane		5293	30	159	4 285	0,81	141	-		300	
Hamady Ounaré		10175	30	305	2 165	0,21	71	2	82	459	
Kanel		12975	30	389	4 980	0,38	164	-		554	
Ndendory	3 242	32182	25	805	40 004	1,24	1 320	-		2 125	0,66
Odobéré		6028	30	181	1 808	0,30	60	-		241	
Orkadiéré	377	40533	25	1 013	25 332	0,62	836	12	493	2 342	6,21
Ouro Sidy	3 052	37307	25	933	26 926	0,72	889	12	493	2 314	0,76
Sémmé		6891	30	207	6 250	0,91	206	5	205	618	
Sinthiou Bamambé - Banadji	550	13822	30	415	4 200	0,30	139	11	452	1 005	
Waoundé		7815	30	234	3 673	0,47	121	0	0	356	
Agnam Civol	719	26321	25	658	23 216	0,88	766	16	658	2 082	2,90
Bokidiawé	596	52282	25	1 307	38 602	0,74	1 274	2	82	2 663	4,47
Dabia	432	23121	25	578	28 208	1,22	931	10	411	1 920	4,44
Matam		17218	40	689	3 042	0,18	100	0	0	789	
Nabadji Civol	551	52372	25	1 309	41 200	0,79	1 360	35	1 438	4 107	7,45
Nguidilogne		10444	30	313	3 133	0,30	103	-		417	
Ogo	2 686	45592	25	1 140	50 600	1,11	1 670	9	370	3 179	1,18
Oréfondé	623	19175	25	479	21 930	1,14	724	2	82	1 285	2,06
Oourossogui		15654	35	548	12 745	0,81	421	0	0	968	
Thilogne		10441	30	313	5 022	0,48	166	-		479	
Lougré Thioly	1 774	3300	25	83	33 400	10,12	1 102	-		1 185	0,67
Oudalaye	11 292	26905	25	673	95 298	3,54	3 145	10	411	4 228	0,37
Ranérou		3026	30	91	1 027	0,34	34	-		125	
Vélingara	2 612	18081	25	452	50 386	2,79	1 663	-		2 115	0,81
Total Région		562 536		14 913	605 871		19 994	130	5 342	40 249	

(1) D'après Service Régional Statistiques et Démographie, Matam 2015 (2) 40 l/j pendant 300j/an équivalent à 33 l/j moyen

4.3.2. Reconstitution de l'évolution des prélèvements dans le temps

4.3.2.1. Evolution des prélèvements totaux

4.3.2.1.1. Recherche de données anciennes

Avant la réalisation des premiers forages au Maastrichtien, la totalité des prélèvements s'effectuait dans des puits, captant la nappe alluviale dans le Dandé Mayo, la nappe éocène (ou de petites nappes perchées) dans le Diéri, et exclusivement le Continental Terminal dans le Ferlo.

Depuis la réalisation des premiers forages (années 1950) jusqu'à aujourd'hui, on recense dans la bibliographie au moins 4 tentatives d'estimation des volumes prélevés, concernant la région de Matam :

- Une première estimation des prélèvements dans la nappe profonde est apparue dans Audibert, 1966 (cité dans la thèse de Dieng). Elle concerne les pompages de la « partie

intérieure du bassin », sans plus de précision. Pour tenter d'approcher ce qui revient à la région de Matam, nous pondérerons ces valeurs par un coefficient arbitraire de 0,5.

Estimation des prélèvements dans le Maastrichtien dans les années 1950

Prélèvements (M m ³ /an)	1951	1953	1955	1957	1959	1960
« Partie intérieure du bassin »	0.34	0.93	1.64	2.38	4.33	4.67
Région de Matam (« Partie intérieure du bassin » × 0.5)	0.17	0.46	0.82	1.19	2.16	2.33

Une estimation des prélèvements totaux, tenant compte des pompages par puits dans les nappes superficielles, sera tentée plus loin pour les années 1950 et 1960.

- Un deuxième jalon est fourni par les chiffres de la SOMH (ex-DHR) récapitulant les volumes exploités dans les années 1975 pour les « forages ruraux motorisés des sections de Matam, Linguere et Louga ». En l'absence d'explications sur l'extension réelle de ces sections, nous évaluerons la consommation des forages de la région de Matam par la formule approchée suivante :

Région de Matam = 100 % section Matam + 10 % section Linguère + 20 % section Louga

Estimation des prélèvements dans les forages motorisés de la région de Matam dans les années 1975

	1975-76	1976-77
Prélèvements (M m ³ /an)	1.08	1.54

Ces chiffres couvrent les prélèvements dans les forages captant, soit le Maastrichtien, soit le CT (ces derniers ne devant représenter qu'une faible partie du total). Nous retiendrons pour 1975 le chiffre de 1.55 Mm³/an, auquel nous ajouterons plus loin une estimation des volumes exploités par les puits, ainsi que celle des villes (cf. 4.3.2.1.).

- Un troisième jalon est apporté par le Répertoire des Forages d'eau de 1984 (Service Hydrogéologique de la DEH), qui fournit les données de population et de cheptel, ainsi que le nombre d'ouvrages répertoriés.

A partir de ces données, nous tenterons une évaluation de la consommation d'eau domestique sur une base de 20 l/hab/jour sur 300j/an, pour tenir compte de la période d'hivernage pendant laquelle les populations utilisaient préférentiellement l'eau des mares et marigots. De façon arbitraire, nous abattons de 5 % le chiffre de la population du département de Matam, pour tenir compte des populations qui continuaient à s'alimenter toute l'année directement en eau du Fleuve.

Pour le bétail, nous appliquerons, comme pour la période actuelle, une dose théorique de 33 l/j/UBT. Un abattement de 15 % sur le nombre d'UBT sera de même introduit pour tenir compte de l'alimentation directe à partir du Fleuve.

Enfin, nous ajouterons le volume de production d'eau potable de la ville de Matam, fourni par la SONES.

Population, cheptel, nombre de forages et estimation des prélèvements correspondants en 1984

	Population (hab)	Cheptel (UGB)	Nombre d'ouvrages répertoriés	Evaluation consommation humaine (Mm3/an)	Evaluation consommation bétail (Mm3/an)	Evaluation consommation totale (Mm3/an)
Département de Matam	207 000	255 000	55	1.18	2.60	3.78
Communes de Ranéro, Lougre Thioly et Velingara	31 000	155 000	7	0.19	1.86	2.05
Commune de Matam			-	0.14		0.14
Total	238 000	410 000	62	1.42	3.38	5.82

Selon cette estimation, en négligeant les rares utilisations agricoles, le prélèvement total d'eau souterraine en région de Matam en 1984 aurait atteint de l'ordre de 5.8 Mm3/an. Ramené au nombre de forages (alors que cette estimation englobe également de nombreux puits), ceci équivaldrait à une production annuelle de 94 000 m3/an/forage (257 m3/j/forage).

En 2011, le rapport JICA a procédé à de nouvelles estimations, sur la base des données de population et avec les approximations suivantes :

- Ne sont pris en compte que les forages motorisés, puisage manuel et pompes à motricité humaine étant considérée comme négligeables ;
- Les besoins en eau potable sont estimés à partir d'une dose maximale de 35l/j/hab au mois de pointe (mai), une pondération mensuelle étant ensuite appliquée pour tenir compte de l'hivernage ; les coefficients mensuels varient alors de 1.0 (mai) à 0.43 (août), avec une moyenne de 0.74, ce qui correspond à une dose moyenne annuelle de 26 l/j/hab
- Les besoins du bétail sont estimés en appliquant un ratio [têtes de bétail / population = 2.57]¹⁴

Ces normes sont appliquées aux forages, regroupés par aquifère, ce qui permet une estimation sélective, entre les années 1988 et 2007. Malheureusement, les chiffres sont calculés pour l'ensemble des régions de Matam et de Tambacounda, ce qui nous conduit à une répartition très approximative entre les deux régions. Les résultats obtenus sont reproduits ci-après.

Estimation des prélèvements par aquifère entre 1998 et 2007 (Source : JICA)

	1988	1990	1995	2000	2005	2007
Quaternaire	0.08	0.09	0.16	0.16	0.16	0.16
CT	1.43	1.42	1.47	1.48	1.40	1.29
Eocène	0.14	0.14	0.16	.16	.16	.16
Maastrichtien	5.00	5.34	6.02	6.10	6.29	6.46
Total	6.64	7.00	7.80	7.90	8.01	8.07

¹⁴ D'après la Direction de l'Elevage et la DHR pour le Plan d'approvisionnement en eau

- Enfin, la dernière estimation est celle qui résulte de l'exploitation du fichier « Répertoire des forages de la région de Matam », établi par la BPF de Matam en 2012. Celui-ci récapitule les volumes distribués par 109 forages (sur un total inventorié de 131), sous la forme d'un débit d'exploitation et d'une durée moyenne de pompage par jour pour chacun des ouvrages.

Les volumes exploités varient de 30 m³/j à 900 m³/j (forage Ourosogui F1). Le total distribué par an s'élève à 8 490 000 m³, ce qui représente 23 300 m³/j moyen et 213 m³/j/forage.

4.3.2.1.2. Estimation des prélèvements dans les puits

Il convient maintenant d'évaluer les prélèvements par puits (dans les nappes superficielles, soit le Quaternaire, l'Eocène et le CT), qui n'étaient pas pris en compte dans ces estimations successives. Or, si ces prélèvements sont devenus aujourd'hui relativement négligeables, ils étaient loin de l'être avant la généralisation du pompage mécanique, puisqu'ils subvenaient à eux seuls à l'essentiel des besoins hors période d'hivernage. On sait notamment que certains grands puits pastoraux pouvaient produire, par puisage manuel ou animal, plus de 50 m³/j.

La méthode d'évaluation retenue part des données de population et de cheptel de 2013 (recensement et statistiques bétail du SRSD) ainsi que des informations sur le nombre de puits (malheureusement lacunaires) fournies dans les PLHA¹⁵, puis remonte dans le temps.

On déduit des données des PLHA (cf. Annexe 5 | Synthèse des informations fournies dans les rapports PLHA en région de Matam) que le nombre de puits modernes devait être vers 2011 d'environ 90 unités sur les 14 CR, dont au moins 25 puits à motricité humaine (PMH), auxquels on peut ajouter une dizaine de puits pour les communes urbaines. Le nombre de puits traditionnels devait pour sa part atteindre 500 à 1 000 unités.

A partir de ces chiffres, nous nous lancerons dans une tentative d'estimation, avec toutes les incertitudes existantes, en imaginant, pour chacun des horizons de temps, un nombre d'ouvrages et une production moyenne journalière (sur une période limitée à 300 jours/an pour tenir compte de la faible utilisation des puits pendant l'hivernage).

Les chiffres ainsi obtenus illustrent la décroissance logique des prélèvements dans les puits, qui sont passés de près de 4 Mm³/an en 1950 à près de 800 000 m³/an dans les années 2011-2015, malgré l'augmentation de la population et du cheptel. Mais si les prélèvements dans les puits ont été divisés par 5 entre 1950 et 2015, ceux dans les forages ont été, eux, multipliés par 35.

Tentative d'évaluation des prélèvements par puits entre 1950 et 2015

		1950	1975	1984	1995	2007	2011	2015
Puis modernes	Nb	150	150	150	120	110	100 ¹	90
	Dose	40	30	25	20	15	10	10
	Prod.	1 800 000	1 350 000	1 125 000	720 000	495 000	300 000	270 000
Puits tradition.	Nb	350	400	450	500	600	600 ²	550
	Dose	20	20	15	10	5	3	3
	Prod.	2 100 000	2 400 000	2 025 000	1 500 000	900 000	540 000	495 000
Production totale		3 900 000	3 750 000	3 150 000	2 220 000	1 395 000	840 000	765 000

1 : dont 10 pour les communes urbaines

2 : dont 100 pour les communes urbaines

¹⁵ Plan Local d'Hydraulique et d'Assainissement

4.3.2.1.3. Estimation des prélèvements des commune urbaines

Le tableau ci-dessous présente les données de population et les volumes prélevés des trois principales communes urbaines, dans lesquelles l'AEP représente l'usage de loin dominant¹⁶. Ces données sont présentées ici pour permettre d'apprécier les volumes prélevés et les doses unitaires correspondantes, même si ces prélèvements sont déjà intégrés dans le décompte tiré de l'inventaire.

Données de population et de production des communes urbaines

Commune	Population			Dose estimée		
	2009	2011	2015	M3/j	M3/an	l/j/hab
Matam	18 726	20 254	23 694	950	346 750	40,1
Ourossogui	16 951	18 334	21 448	1245	454 425	58,0
Waoundé	9 955	10 767	12 596	215	78 475	17,1
Total/Moyenne	96 937	104 847	122 654	2 410	879 650	41,7

On notera que les volumes exploités incluent les pertes des réseaux, et qu'en conséquence les doses unitaires réelles doivent en tenir compte : par exemple à Matam où le rendement de réseau est de l'ordre de 85 %, la dose unitaire tomberait à 41 l/j/hab, tandis qu'avec des rendements probables de l'ordre de 75 % à Ourossogui et Waoundé, les doses unitaires y avoisineraient 40 et 20 l/j. Les différences constatées pour ces deux villes par rapport à Matam peuvent être probablement attribuées :

- pour Ourossogui, au fait qu'à la population permanente comptabilisée s'ajoute une forte population transitoire, liée aux activités économiques de ce nœud routier (gare routière, stations services, marché, hôpital régional, commerces...) ; la dose unitaire réelle calculée sur la population résidente serait certainement plus basse.
- pour Waoundé, à celui que le réseau ne dessert encore qu'une partie des besoins de la commune.

4.3.2.1.4. Estimation des prélèvements totaux

Le tableau récapitulatif ci-après présente finalement la reconstitution de l'historique des prélèvements résultant de la démarche qui vient d'être décrite. Cette reconstitution tient compte successivement :

- du pourcentage des forages totaux qui étaient réellement exploités aux différentes dates (calculé pour l'inventaire ADOS/DRH, évalué pour les autres sources) ;
- des volumes exploités dans les communes urbaines (intégrés dans le total pour l'inventaire, évalués pour les autres dates) ;
- des forages publics non inventoriés : ceux-ci sont estimés à environ 10 pour l'inventaire, et on leur attribue une production moyenne de 180 m³/j (6h à 30 m³/h), soit un total additionnel de 660 000 m³/an ; les valeurs des autres dates sont évaluées ;
- des forages privés non inventoriés (l'inventaire en inclut 3) : ils sont également estimés à 10 pour 2015, avec une production équivalente de 180 m³/j, soit un nouvel ajout de

¹⁶ Pour la commune de Waoundé, le SRSD fournit un chiffre notable de bétail sur la commune, mais d'après les informations collectées dans l'inventaire, le bétail s'alimente au fleuve et ne boit qu'exceptionnellement à l'abreuvoir

660 000 m³/an ; une évaluation de la progression du nombre de forages privés est tentée pour les autres dates.

Les prélèvements totaux des forages finalement obtenus sont exprimés d'abord en volume : ils varient alors de 0.4 Mm³/an en 1950 à 12.9 Mm³/an en 2015. Ils sont également exprimés en volume unitaire moyen par forage exploité. On note alors de fortes variations dans le temps, probablement peu significatives jusque dans les années 1980, où la mise en service de forages à fort débit conduit à des productions unitaires de l'ordre de 130 000 m³/an. A partir des années 2000, on constate un mouvement inverse de réduction des productions unitaires : cette réduction résulte certainement de l'introduction, puis de la multiplication, des forages solaires à petit débit (20 % des forages inventoriés).

On ajoute finalement à cette reconstitution celle des prélèvements dans les puits: les prélèvements totaux obtenus varient alors de 4.3 Mm³/an en 1950 à 13.7 Mm³/an en 2015 (facteur multiplicatif = 3.2).

Cette augmentation ne reflète évidemment pas celle des seuls prélèvements dans les forages (dont le facteur multiplicatif sur la même période est de 35), puisque elle est tempérée par l'évolution en sens inverse des prélèvements par puits. La colonne de droite du tableau propose des valeurs légèrement corrigées, avec un lissage supposé mieux tenir compte de leur progression logique dans le temps.

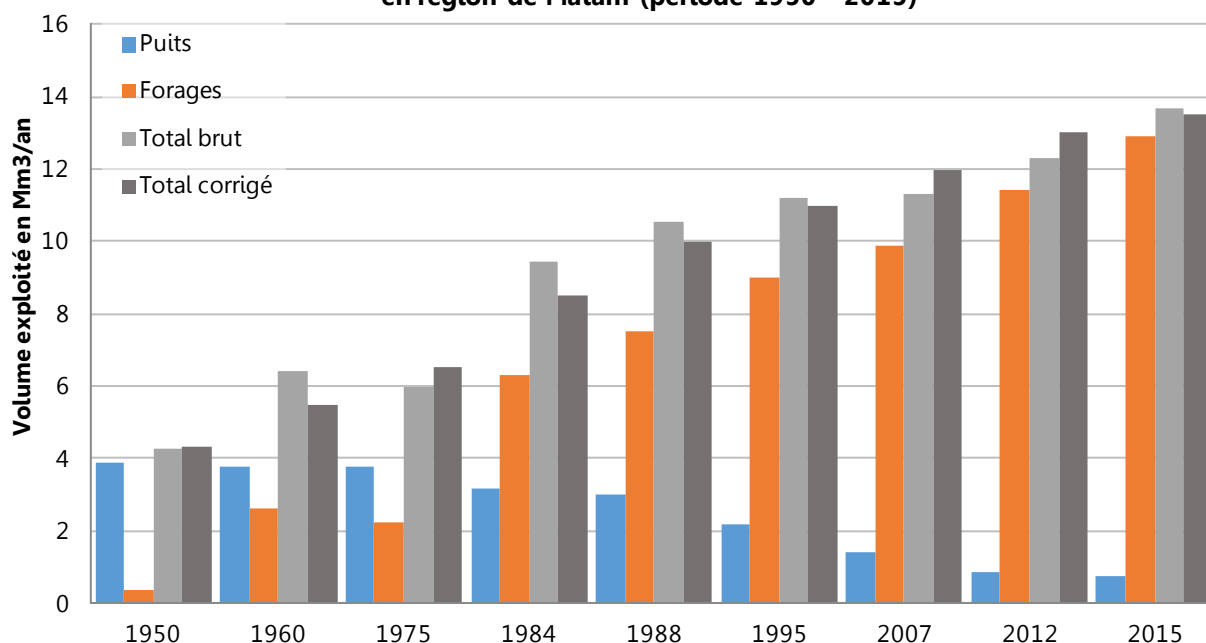
Reconstitution de l'historique des prélèvements totaux en région de Matam

Année	Source	Prélèvements par forage										Prélèvements par puits (Mm³/an)	Prélèvements totaux (Mm³/an)	
		Nombre de forages				Volumes (Mm³/an)								
		Pris en compte dans les évaluations	Totaux (inventoriés)	Evaluation total forages exploités		Forages exploités inventoriés	Communes urbaines	Forages non inventoriés	Forages privés	Total forages	m3/an/forage exploités	Total puits	Données brutes	Données corrigées
nb	%													
1950	Audibert	5	2	2	1,00	17,00	0,20	0,00	0,00	0,37	85 000	3,90	4,27	4,3
1960	Audibert		11	10	0,91	2,33	0,20	0,10	0,00	2,63	233 000	3,80	6,43	6,0
1975	SOMH		30	30	1,00	1,55	0,40	0,20	0,10	2,25	51 667	3,75	6,00	6,5
1984	Répertoire forages	62	57	42	0,74	5,82	0,20	0,20	0,10	6,32	138 571	3,15	9,47	9,5
1988	JICA		81	49	0,60	6,64	0,30	0,40	0,20	7,54	136 523	3,00	10,54	10,5
1995	JICA		110	61	0,55	7,80	0,40	0,50	0,30	9,00	128 926	2,20	11,20	11,5
2007	JICA		188	94	0,50	8,07	0,64	0,70	0,50	9,91	85 851	1,40	11,31	12,5
2012	DRH	109	225	109	0,48	8,50	0,35	2,00	0,60	11,45	77 982	0,85	12,30	13,0
2015	DRH ADOS	121	239	174 (1)	0,73	11,60 (2)		0,66	0,66	12,92	74 253	0,77	13,69	14,0

(1) 154 + 10 (non-inventoriés) + 10 (privés)

(2) 11.6 Mm³/an (2015) provient des 31 800 m³/j calculés sur les 154 forages exploités inventoriés

Reconstitution de l'historique des prélèvements des eaux souterraines en région de Matam (période 1950 – 2015)



4.3.2.2. Tentative de ventilation par aquifère

Une première approche est possible en partant de la reconstitution des prélèvements par JICA (chiffres 2007) :

- Quaternaire = 2 % des prélèvements totaux
- Continental Terminal = 16 % des prélèvements totaux
- Eocène = 2 % des prélèvements totaux
- Maastrichtien = 80 % des prélèvements totaux

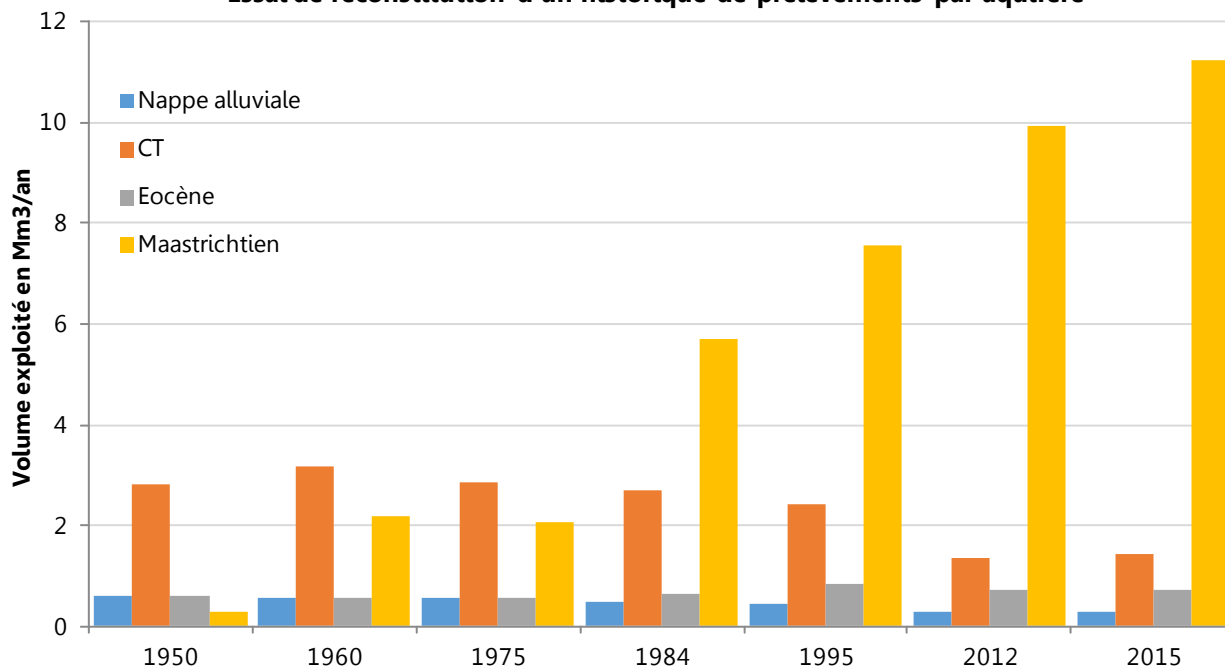
Cependant, ces chiffres concernent, comme on l'a vu, à la fois la région de Matam et celle de Tambacounda, et leur réduction à la seule région de Matam n'est pas évidente.

Une autre reconstitution est donc tentée à partir des résultats de l'inventaire, en appliquant pour les prélèvements par puits une clé de répartition arbitraire, et pour les prélèvements par forages, l'attribution de ceux-ci par aquifère dans l'inventaire. Une pondération est introduite sur les débits des forages, le débit moyen des forages au Maastrichtien étant jugé supérieur de 25 % à celui des forages au CT, de 35 % à celui des autres forages.

Tentative de ventilation des prélèvements par aquifère en 2015

Aquifère	Prélèvement puits		Prélèvement forages		Prélèvement totaux	
	%	Mm³/an	Nb forages exploités	Mm³/an	Mm³/an	%
Quaternaire	15	0,12	3	0,16	0,27	2
Eocène	15	0,12	12	0,62	0,74	5
CT	70	0,54	15	0,89	1,43	10
Maastrichtien	0	0,00	144	11,23	11,23	82
Total	100	0,77	174	12,92	13,69	100

Essai de reconstitution d'un historique de prélèvements par aquifère



On voit sur le graphique comment les prélèvements dans l'aquifère Maastrichtien (tous confondus) sont devenus, au fil des années, prépondérants, au détriment de ceux qui s'opèrent dans le Continental Terminal.

4.3.2.3. Application : évaluation des volumes extraits totaux

Une intégration sommaire de ces valeurs sur l'ensemble de la période 1950-2015 permet d'évaluer les volumes totaux extraits des différents aquifères :

- Quaternaire (nappe alluviale + nappes perchées) = 31 Mm³ (5 %)
- Continental Terminal = 164 Mm³ (29 %)
- Eocène = 43 Mm³ (7 %)
- Maastrichtien = 332 Mm³ (58 %)

Le pourcentage relativement bas du Maastrichtien, qui contraste avec les 82 % de la situation actuelle, découle du volume important extrait dans les puits captant le CT dans la période précédant l'explosion du nombre des forages dans cette nappe.

Il faut maintenant rappeler que ces prélèvements se sont effectués dans des nappes dotées de régimes différents :

- La nappe alluviale du Fleuve et les nappes perchées, en relation directe avec les écoulements superficiels, sont rechargées, et l'on peut considérer -schématiquement- que leur compteur est remis à zéro tous les ans
- Le Continental Terminal n'est pas rechargé, ou marginalement, et le prélèvement s'est donc effectué sur ses réserves
- L'Eocène n'est que partiellement rechargé, peut-être par la pluie en année humide, peut-être latéralement par la nappe alluviale
- Le Maastrichtien est comme on l'a vu partiellement rechargé par la nappe alluviale (avec une zone d'influence indéterminée à ce jour) ; mais sur l'essentiel de son extension en région de Matam la nappe est fossile.

Un petit calcul vérificatif peut alors être tenté : si l'on applique un prélèvement total de 250 Mm^3 en 65 ans (hypothèse sur la fraction non rechargée) à une surface de $25\,000 \text{ km}^2$ (surface concernée équivalente), on obtient une baisse théorique totale du niveau de :

- 100 m pour un coefficient d'emmagasinement de 10^{-4}
- 10 m pour un coefficient d'emmagasinement de 10^{-3}

Or, nous l'avons vu, la baisse moyenne sur l'ensemble du Ferlo matamois n'a pas dû dépasser 3 à 4 mètres. On pourrait en déduire que, soit le coefficient d'emmagasinement de longue durée est plus élevé (2 à $3 \cdot 10^{-3}$), soit la fraction rechargée de la nappe s'étend plus loin dans l'intérieur.

Ce type d'approximation très grossière restant évidemment à préciser par une étude hydrogéologique plus poussée (avec un modèle mathématique d'ensemble).

4.4. Piézométrie par aquifère

4.4.1. Continental Terminal

4.4.1.1. Piézométrie actuelle

Une ébauche de carte piézométrique, basée sur les mesures récapitulées sur le tableau du chapitre 4.2 est présentée sur la carte suivante. Elle repose essentiellement sur les mesures réalisées dans le cadre de l'inventaire des forages DRH/ADOS, caractéristiques de la période « actuelle » qui va comme on l'a vu de novembre 2012 à janvier 2015. Les mesures ne sont donc pas synchrones, et si l'on peut penser que la variation interannuelle des niveaux a dû être faible sur une période aussi courte, il n'en est probablement pas de même des variations saisonnières, dont on a vu au chapitre 4.1. qu'elles pouvaient être importantes dans le CT.

D'autre part, les altitudes des repères de mesure, fournie par GPS, sont entachées d'incertitudes importantes (difficulté à stabiliser la valeur d'altitude même quand le GPS est fixe), pouvant vraisemblablement atteindre ± 5 m. Cette incertitude nous autorise à compléter la carte par quelques mesures « anciennes », l'évolution possible du niveau entre la date des essais et la période actuelle étant supposée faible devant l'approximation sur l'altitude des repères de mesure.

A ces réserves près, la carte montre nettement l'approfondissement vers l'ouest de la surface piézométrique : en bordure du Fleuve, les cotes piézométriques s'établissent autour de + 10m, c'est-à-dire plus ou moins au niveau de la ligne d'eau du Fleuve, voire légèrement au-dessus compte-tenu des phases de submersion de la crue annuelle qui inonde partiellement le Walo. Puis les niveaux s'enfoncent rapidement, la cote 0 étant atteinte 5 à 10 km à l'ouest de l'axe routier.

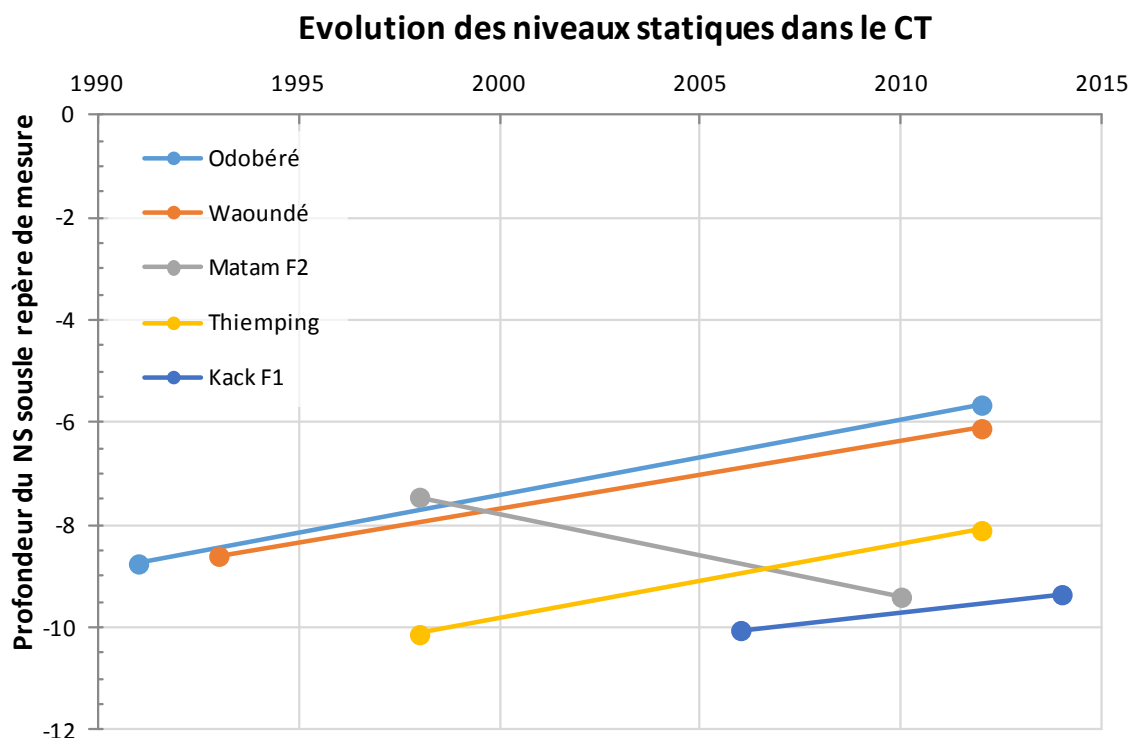
La surface piézométrique « en creux » se dessine alors rapidement vers l'ouest, les cotes du secteur Namary - Thiangol Dendoudi - Katane se situant entre -15 et -20 m NGS. Plus à l'ouest encore, on approche -25 m NGS à Kack, et jusqu'à -40 m NGS (-82 m sous le sol) à Kossas, tandis qu'au sud-ouest les niveaux remontent (- 19 m à Velingara et - 8 m à Mboundoum Mbaba).

4.4.1.2. Evolution des niveaux statiques dans le temps

Seuls 5 forages inventoriés fournissent deux mesures de niveau statique, l'une recopiée des essais d'origine, l'autre effectuée à la date de la visite d'inventaire du point d'eau. La figure ci-après permet de constater que 4 des 5 ouvrages ont vu leur niveau monter depuis les années 1990-2000 avec des vitesses de montée comparables, de l'ordre de 13 cm/an. C'est ainsi que le niveau est monté de +3.10 en 23 ans à Odobéré, de +2.03m en 15 ans à Thiemping. Seul le forage Matam F2 semble avoir enregistré une baisse, mais étant activement exploité par la SDE, il est probable que la mesure d'octobre 2010 soit en fait influencée par le pompage précédent (ou par celui du F1 situé à 100 mètres).

La réalité de cette montée apparente du niveau reste à confirmer, et bien entendu à expliquer si elle est avérée. De fait, de nombreux éléments sont à prendre en compte, à commencer par les dates exactes des mesures. En effet, plusieurs des mesures anciennes ne mentionnent que l'année, et ont été reportées arbitrairement au 01/01 de l'année considérée, tandis que les mesures de l'inventaire des 4 forages ont été effectuées, soit en novembre 2012, soit en novembre 2014, c'est-à-dire en fin d'hivernage. Or l'on sait que le CT est affecté de fortes variations piézométriques, au moins dans la région du Ferlo, entre la fin de la saison sèche (mai-juin) et la fin de l'hivernage marquée par une forte réduction des pompages. Ce pourrait être le cas du F1 Kack, où la montée du niveau de seulement 0.7 m entre juin 2006 et novembre 2014 pourrait bien être attribuable au seul effet saisonnier.

Un autre élément à considérer est le fait qu'avec seulement deux points de mesure par captage, on ne connaît pas réellement l'évolution intermédiaire des niveaux. On pourrait par exemple être passés par un maximum en 2010, puis se trouver dans un cycle de baisse. On attendra donc l'analyse des niveaux du Maastrichtien, qui semble révéler une évolution comparable en bordure du Fleuve, pour confirmer et tenter d'expliquer le phénomène. On notera cependant que les forages d'Odobéré, Thiemping et Waoundé se situent tous trois dans le Dandé Mayo.



4.4.2. Eocène

Les niveaux statiques absolus, proches de ceux du Fleuve, sont probablement situés entre +5 et +10 m NGS. Leur profondeur dépend donc de l'altitude du sol, et peut donc atteindre jusqu'à une trentaine de mètres dans les zones les plus hautes.

On ne possède par ailleurs aucune valeur ancienne susceptible de mettre en évidence une évolution des niveaux. A Sinthiou Garba, où des mesures périodiques du niveau de quelques puits sont disponibles depuis 2010, ceux-ci sont stables à quelques dizaines de centimètres près. On n'y décèle notamment aucune variation saisonnière imputable à une recharge par les pluies de l'hivernage.

On peut en déduire que, dans ce secteur au moins, où la nappe est assez profonde, il n'existe aucune recharge par les précipitations, déduction cohérente avec la salinité élevée de la nappe dans ce même secteur.

4.4.3. Maastrichtien

4.4.3.1. Piézométrie actuelle

Les mesures effectuées dans le cadre de l'inventaire pourraient permettre de tracer une bonne carte piézométrique de l'aquifère, compte tenu de leur nombre, mais seulement dans la mesure où elles seraient accompagnées d'un nivellement suffisamment précis des repères de mesure. Or ce n'est pas

le cas, puisque les mesures d'altitude prises au GPS sont affectées d'une incertitude notable, qui peut atteindre dans certains cas + - 5m, voire plus.

Contrairement au Continental Terminal, dans lequel il existe un fort gradient hydraulique permettant de négliger les erreurs faites sur les altitudes (après correction des plus évidentes), la surface piézométrique du Maastrichtien, connue au travers des cartes anciennes, est relativement plate. Comme rappelé au chapitre 4.1.6., elle évoluait dans les années 1970 entre +12 m au sud-est et +6 m NGS au nord-ouest de la région de Matam, ce qui avec les variations de niveau qui vont être analysées ci-après doit la ramener entre +12 m et 0 m.

4.4.3.2. Evolution des niveaux statiques dans le temps

Un effort particulier a été apporté à la recherche de valeurs anciennes du niveau statique, permettant d'apprécier son évolution par rapport aux mesures effectuées dans le cadre de l'inventaire (qui ont pu être complétées de quelques mesures effectuées par la DGPPE dans son réseau).

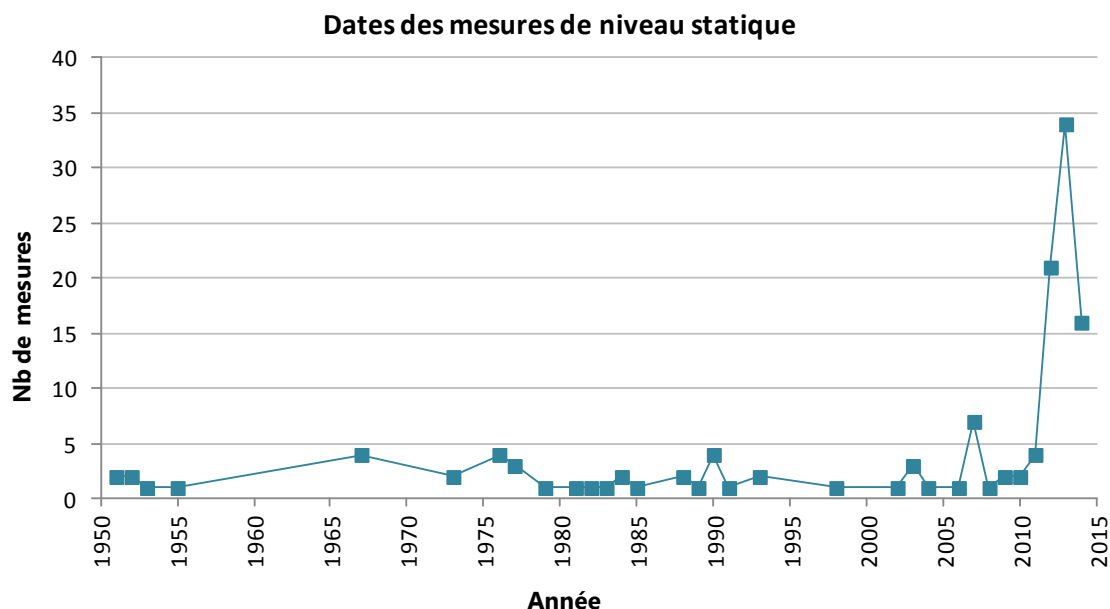
C'est ainsi qu'ont pu être retrouvés, et sélectionnés après élimination de quelques cas douteux :

- 35 forages sur lesquels il existe, en plus de la mesure récente, une mesure « ancienne »
- et 15 doublons (parfois triplettes) de forages voisins, dans lesquels une mesure « ancienne » peut être rapportée à une ou plusieurs « mesure(s) actuelle(s) »

On entend par « ancienne » toute mesure effectuée entre 1950 et 2010, et par « actuelle » toute mesure effectuée entre novembre 2012 et mars 2015, période de déroulement de l'inventaire, pendant laquelle on estime que les variations interannuelles ont dû être marginales.

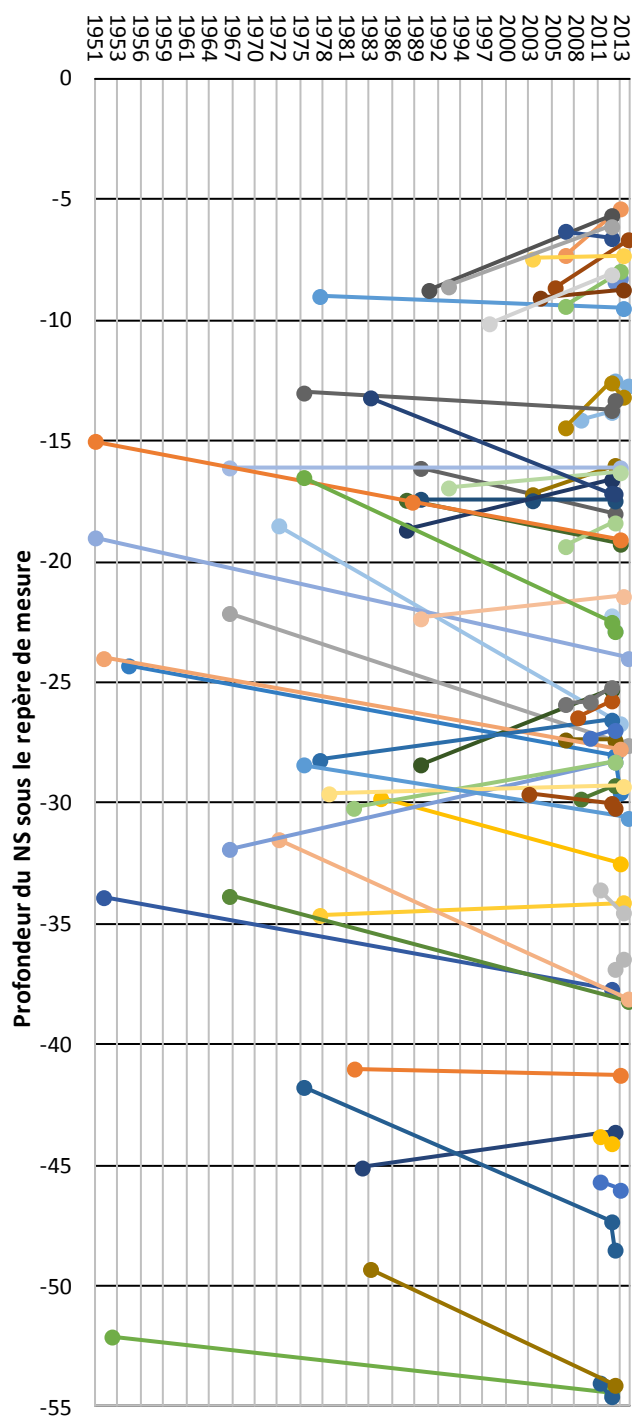
Il y a donc place pour une autre catégorie, celle des mesures « récentes », effectuées entre mars 2009 et novembre 2012, qui permettent de préciser un peu l'évolution plus récente des niveaux.

Le graph ci-dessous permet d'apprécier la répartition des « mesures anciennes » et récentes.



On note que 6 mesures ont pu être retrouvées dans les années 1950, 4 dans les années 1960, 10 dans les années 1970. Les valeurs les plus anciennes correspondent généralement aux forages pastoraux du Ferlo, celles, nombreuses, des années 1990 ou 2000, se regroupent dans les secteurs de la RN2 et du Dandé Mayo où ont été développés les programmes récents de création de systèmes AEP.

Evolution des niveaux statiques depuis l'origine des mesures



La précision des reconstitutions effectuées dépend évidemment des modifications survenues sur les points de référence (repères de mesure), dont la hauteur par rapport au sol est rarement fournie. Lorsque l'on est certain que les mesures successives ont été effectuées dans le même ouvrage, l'erreur résultant des modifications de hauteur du repère (par suite de la découpe d'un tubage, du choix d'un repère différent, etc.) est certainement faible. En revanche, pour les mesures impliquant des forages voisins, et malgré l'introduction de corrections pour tenir compte des différences de hauteur des repères (mesurées sur les sites), la marge d'erreur est certainement plus notable. Elle ne devrait cependant pas dépasser, le mètre. Ceci semble confirmé par l'homogénéité des résultats obtenus, visible sur la carte d'évolution des niveaux suivante.

Enfin, le caractère « statique » des niveaux mesurés n'est pas toujours garanti. Dans plusieurs cas, les niveaux mesurés dans le cadre de l'inventaire étaient influencés, soit par des remontées incomplètes, soit par des pompages en cours dans des ouvrages voisins. Dans ces cas, une marge d'influence, estimée selon les cas de 0.1 à 0.5 m, a été déduite des mesures correspondantes. Au final, les incertitudes résultantes ne devraient pas là non plus dépasser quelques dizaines de centimètres, soit au final une précision de l'ordre de 1 à 1.5 m.

D'autre part, compte tenu du caractère aléatoire des dates de mesure, et du petit nombre de celles-ci sur un même ouvrage ou un même groupe d'ouvrages, les reconstitutions effectuées ne peuvent nous renseigner valablement sur les variations saisonnières du niveau (sauf peut-être pour quelques forages sur lesquelles on dispose de 3 mesures récentes). Cette analyse des variations saisonnières reste à faire ; elle devrait découler du

travail de suivi effectué par la DGPRES dans son réseau, à condition que celui-ci soit suffisamment étoffé et que les niveaux statiques soient réellement mesurés à des dates régulières, ce qui ne semble pas toujours être le cas, ou dans le meilleur des cas enregistrés par un thalimètre¹⁷.

L'ensemble des valeurs finalement retenues, qui permettent d'apprécier les variations interannuelles du niveau dans le Maastrichtien, est finalement porté sur le graph ci-dessous.

¹⁷ Le forage Agnam Civol 08-2X-004 (piézo P6 DGPRES) a été équipé d'un enregistreur pendant une année hydrologique. Le graph présenté dans le rapport JICA (chap 3.3.3) permet de relever une variation de 0.7m entre nov 2008 (max) et juin 2009 (min).

Au-delà de l'apparente complexité qui découle du grand nombre de courbes, ce graphique permet de constater trois types de tendances :

- des baisses modérées à notables (-2 à -8m), qui concernent surtout la comparaison des mesures antérieures à 1980 aux mesures actuelles
- des montées modérées (+1 à +3m), qui concernent surtout la période plus récente (1985 - 2015)
- et entre les deux périodes, quelques courbes représentatives d'une grande stabilité

Le report des valeurs absolues de variation de niveau sur la carte suivante permet alors de vérifier ce qui semblait se dessiner : il existe un très net regroupement géographique des évolutions mesurées. Tous les forages de l'intérieur sont affectés d'une baisse du niveau qui se manifeste donc au-delà des différences visibles d'un forage à l'autre, partiellement imputables aux sources d'erreur analysées ci-dessus, comme un phénomène général.

En revanche, la grande majorité des forages du Dandé Mayo enregistre une élévation de niveau entre les années 1985 - 2005 et la période actuelle. Cette montée est donc analogue à celle qui a été décrite pour le Continental Terminal¹⁸, et peut elle aussi être qualifiée de phénomène général.

Dans le détail, et tout en soulignant que le tracé des courbes d'iso-évolution figurées sur la carte ne peut être qu'indicatif, on distinguera :

- trois zones de remontée maximale du niveau, supérieures à +2 m, et parfois + 3 m, alignées sur le Fleuve mais s'étendant jusqu'au rebord du Diéri (forages de Wouro Sidy et de Semmé) ; ces zones coïncident plus ou moins avec les « dômes » décrits précédemment, dans lesquels, après l'érosion de l'Eocène, le Maastrichtien en position haute se situe directement sous les alluvions
- une zone d'équilibre, marquée par la courbe d'iso-variation 0, plus ou moins alignée sous l'axe routier du Diéri
- à l'ouest de cette ligne, une zone couvrant le reste de la région de Matam, dans laquelle la baisse des niveaux s'accroît progressivement vers l'ouest ; elle est de l'ordre de -2 m à Dendoudy, -4 m à Ranérou, -4 à -8m dans le secteur de Velingara, Naouré, Karé Kabi et Lougré Thioly ; les baisses les plus importantes sont mesurées à Karé Kabi, Belel Touflé et Mboudoum Baba (-6.4 à -6.7 m), ainsi qu'à Mbem Mbem (-8.2 m) et Naouré (-8 m), même si cette dernière mesure semble imprécise.

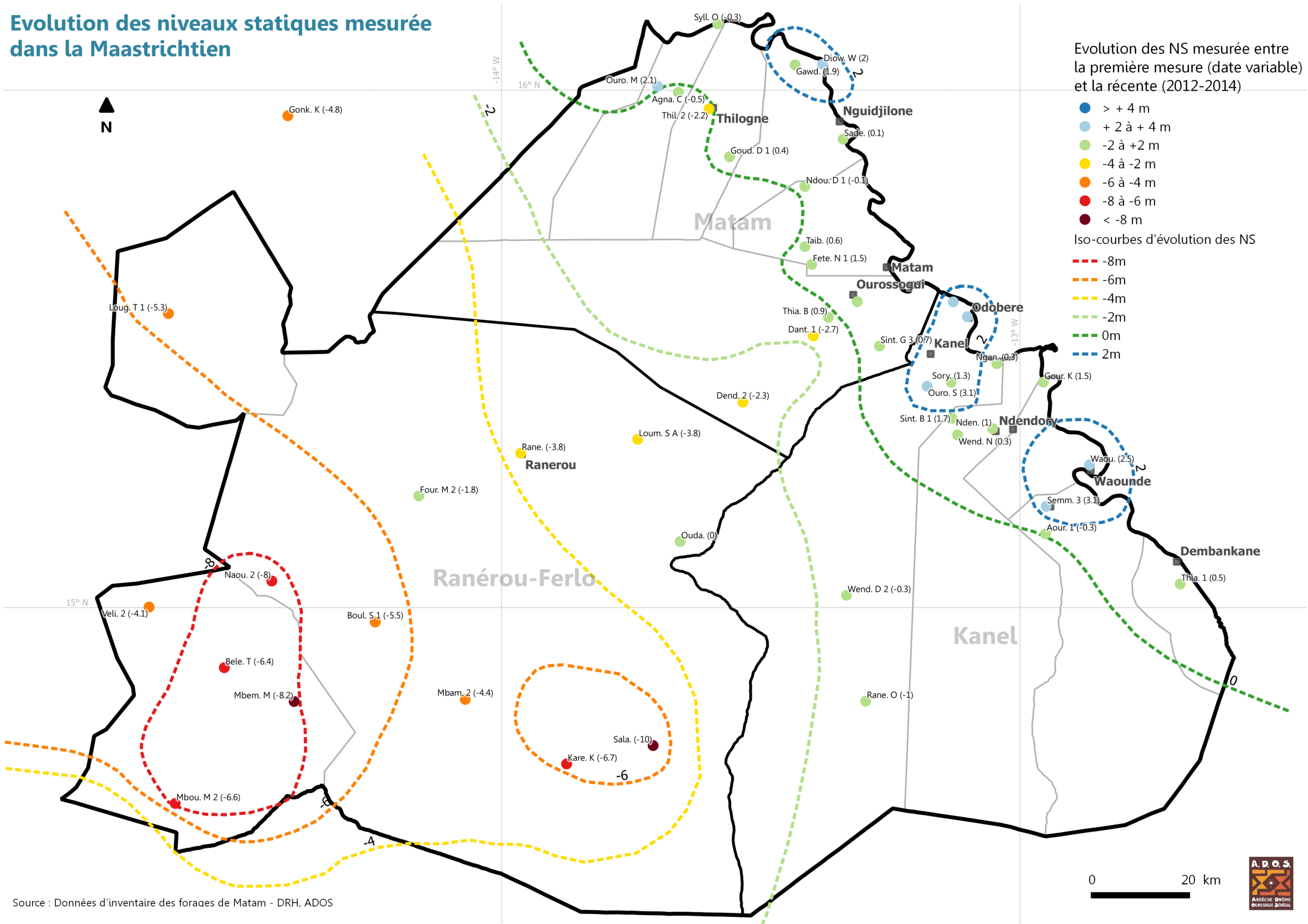
Réflexions sur les causes des baisses de niveaux au niveau du Ferlo

La baisse du niveau dans une nappe captive non réalimentée, sous l'effet de son exploitation, n'est rien moins que normale. Cependant, il est clair que ce processus d'épuisement d'une ressource qui n'est pas illimitée doit être suivi et planifié, afin d'éviter qu'il ne soit trop rapide, et ce d'autant plus que la ressource en question est unique, par son volume et sa qualité dans la région considérée.

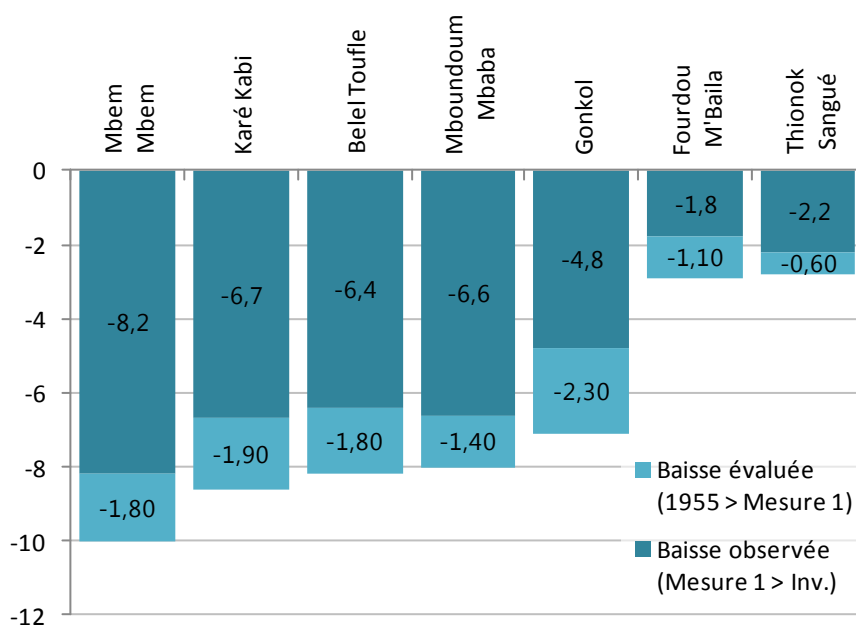
Un premier examen des valeurs brutes des baisses mesurées dans la moitié est de la région montre que celles-ci, comprises entre -1 et -8 m, ne sont pas excessives. Cependant, si l'on s'intéresse à la date d'origine des mesures, par définition variable d'un captage à l'autre, on remarque qu'un certain nombre des plus fortes baisses mesurées l'ont été depuis des dates relativement proches (années 1980), par rapport au début de l'exploitation motorisée des forages (années 1950).

¹⁸ Les trois forages de Thiemping, Odobéré et Waoundé, sont classés comme captant le CT/Maastrichtien, c'est-à-dire soit l'un, soit l'autre, soit un mélange des deux aquifères. Cette redondance assumée illustre le fait que les deux aquifères n'en font qu'un dans ce secteur du Dandé Mayo.

Evolution des niveaux statiques mesurée dans la Maastrichtien



Baisse reconstituée des niveaux statiques (m)



Une extrapolation des mesures de ces années 1980 à une année « origine », que nous choisirons arbitrairement en 1955, peut être tentée. Pour cela, nous appliquerons, par hypothèse, à la période [1955 - 1^{ère} mesure] un taux de baisse annuelle égal à 50 % de celui qui a été mesuré entre cette 1^{ère} mesure et 2014 (pour prendre en compte l'augmentation des prélèvements par forage dans le temps).

Le report de ces valeurs reconstituées sur la carte ci-dessus, en complément des valeurs brutes des forages mesurés dans les

années 1950, met en évidence que tout l'intérieur du Ferlo est concerné par des baisses notables, de -4 à -10 m depuis 1955. Les deux seules valeurs plus faibles (Fourdou Mbaila et Thionock Sangue), sont probablement dues, soit à des erreurs, soit à des contextes locaux qui ne remettent vraisemblablement pas en cause le phénomène d'ensemble.

Cette baisse a d'abord pour origine les pompages réalisés dans cette région elle-même. S'y ajoute, selon toute vraisemblance, l'influence des pompages effectués plus à l'ouest, qui génère une baisse des niveaux sur l'ensemble du réservoir Maastrichtien. Même s'il ne nous a pas été possible de la mettre en évidence à partir des mesures (trop peu nombreuses) réalisées par la DGPRE dans le centre Ferlo, il est probable que, sur la base de mesures effectuées dans les années 1980, la baisse du niveau y approche les -10 m.

Encore plus à l'ouest, une campagne de mesures menée en 2006 dans le cadre d'un diplôme de fin d'étude¹⁹ apporte quelques éléments complémentaires, par comparaison de la carte piézométrique tracée avec celle de 1965. La baisse des niveaux entre 1965 et 2006 aurait atteint :

- -7 m dans le secteur de Thiel - Gassane (ouest de Velingara), près de -8 m à Sadio (ouest de Gassane), -12 m à Déaly (nord-est de Touba)
- -16 m à Mbacké, et -20 m à Touba, où la baisse du niveau s'accompagne d'une inquiétante augmentation de la salinité (résidu sec variant de 1320 à 2200 mg/l suivant les captages²⁰)

La progression extrêmement rapide des besoins en eau de Touba (126 000 m³/j en 2006, 187 000 m³/j simulés en 2026) laisse penser que l'on y atteindra à relativement court terme une situation très préoccupante, même si l'étalement de la zone des pompages préconisée dans l'étude est réalisé²¹.

¹⁹ Modélisation de la nappe du Maastrichtien dans la zone de Touba, M.NDIAYE et S.NGOM, juillet 2006

²⁰ Norme OMS pour l'eau de boisson 1500 mg/l

²¹ La modélisation mathématique réalisée dans le cadre de cette étude fournit des résultats intéressants, mais optimistes dans la mesure où l'essentiel de l'eau extraite provient, en régime transitoire, des limites du modèle, où les potentiels sont imposés... Comme le dit honnêtement l'étude, « l'essentiel des apports provient des limites est et sud-est du modèle », ce qui ne peut qu'accentuer la baisse des niveaux dans ces zones extérieures au domaine modélisé.

Réflexions sur les causes de la montée du niveau à proximité du Fleuve

Contrastant fortement avec ce phénomène précédemment, on observe une montée généralisée des niveaux le long de l'axe du Fleuve, phénomène qui n'est pas décrit ni expliqué dans la bibliographie technique (peu abondante) de cette région. Se pose alors la question de savoir comment, alors que les pompages se sont multipliés surtout depuis 1990 dans le Diéri et le Dandé Mayo, la nappe puisse y être montée de +1,2 à +3,0 m pendant cette même période récente.

Après élimination d'une hypothèse de contrecoup d'une reprise de la pluviométrie après la sécheresse des années 1970, reprise probablement trop timide pour engendrer un impact aussi net, restent seulement deux propositions, qui sont en fait loin d'être entièrement convaincantes :

- La mise en eau du barrage de Manantali situé sur le Bafing (affluent du fleuve Sénégal) au Mali, qui a effectué ses premières restitutions en 1988-89, a conduit à une régulation des débits du fleuve. Si le régime initial, naturel était marqué par :
 - Une période de hautes eaux durant l'hivernage génératrice, sauf en année sèche, d'abondantes submersions du Walo
 - Une période de tarissement de 8 à 10 mois pendant laquelle le niveau du Fleuve pouvait descendre très bas

Le régime du fleuve, régulé est très différent. Après le maintien d'une crue notable, quoique réduite (dite « crue artificielle ») pendant une dizaine d'années, les contraintes de la production hydroélectrique ont prévalu. Depuis une dizaine d'années, seule la partie encore non contrôlée du bassin versant génère une crue, qui se trouve ainsi très réduite par rapport à la situation d'avant-barrage. La contrepartie est le maintien d'un débit à peu près constant toute l'année, qui génère une hauteur d'eau stabilisée globalement au-dessus de l'ancienne ligne d'eau d'étiage. On peut alors penser que cette nouvelle configuration ait pu permettre une recharge accrue de la nappe alluviale, matérialisée par une remontée de son niveau moyen, et que celle-ci se soit transmise rapidement aux aquifères avec laquelle elle est connectée (soit le Continental Terminal et le Maastrichtien, éventuellement l'Eocène).

L'absence ou le trop faible nombre de points intermédiaires pendant cette période de recharge supposée ne permet aujourd'hui pas de confirmer cette hypothèse. D'autre part, celle-ci semble contrariée par au moins deux contre-arguments :

- la persistance dans le temps, au moins apparente, de cette remontée
 - sa propagation assez loin vers l'est, certaines montées du niveau étant notées jusqu'à des distances de 5 à 10 Km du lit du Fleuve
- Une autre hypothèse serait d'imaginer une modification des relations qui existent entre les différents niveaux aquifères du Maastrichtien (et entre ceux-ci et les relais supérieurs, nappe alluviale et CT à proximité du Fleuve). En régime permanent (avant le démarrage des pompages), ceux-ci étaient vraisemblablement tous à l'équilibre. Puis les pompages, affectant quasi-exclusivement dans cette zone les couches supérieures du réservoir, auraient pu déprimer celles-ci, provoquant en retour une augmentation de la drainance ascendante à partir des couches inférieures. Cette hypothèse ne nous paraît guère convaincante.

Finalement, seule une observation plus fine des niveaux sur une nouvelle période suffisamment longue, par exemple 5 années de mesures mensuelles, dans un réseau combinant des piézomètres captant la nappe alluviale, le Maastrichtien, le CT et l'Eocène, avec analyse corrélative des précipitations utiles et des niveaux du Fleuve, pourra permettre d'expliquer ce phénomène et d'analyser ses conséquences.

4.5. Qualité de l'eau par aquifère

4.5.1. Eocène

4.5.1.1. Conductivité

La conductivité des eaux imputées à l'Eocène est, selon les valeurs résumées sur le tableau du chapitre 4.2., très variable. Certains points d'eau affichent en effet des conductivités faibles, comprises entre 50 et 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Dabia, Doundou, Walel F1), alors que d'autres affichent des valeurs élevées de l'ordre de 580 à 1300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Hombo F2, Loumbol B., Sinthiou Garba).

Pour les secteurs à faible conductivité, il est possible qu'il puisse exister une recharge à partir du Fleuve, soit verticale dans le Dandé Mayo (Doundou), soit latérale pour les autres points d'eau situés sur le rebord du Diéri.

En revanche, il semble que les secteurs à relativement forte minéralisation se situent un peu plus loin du Fleuve, ce qui leur interdirait de bénéficier de cette recharge contemporaine. Nous émettrons l'hypothèse que ce serait alors la présence de gypse dans le réservoir qui engendrerait cette augmentation de la minéralisation (avec de fortes concentrations en sulfate, ion SO_4), tranchant avec l'ensemble des eaux souterraines de la région de Matam, qui présentent rarement des résidus secs supérieurs à 400 mg/l.

4.5.1.2. Fer

Une autre caractéristique des eaux de l'Eocène semble être l'absence, ou tout du moins les très faibles concentrations de fer. Seul le forage de Doundou affiche la valeur notable de 0.45 mg/l, toutes les autres valeurs étant inférieures à 0.1 mg/l. Compte tenu de sa localisation sur le Dandé Mayo, il serait alors possible que ce forage, malgré sa faible profondeur (65 m), capte en fait le Maastrichtien.

4.5.2. Continental terminal

4.5.2.1. Conductivité

Les valeurs de conductivité présentées sur le tableau du chapitre 4.2 (ou celles de résidu sec transformées en conductivité par la relation approchée $RS_{\text{mg/l}} = 0.65 \times C_{\mu\text{S/cm}}^{22}$) montrent une minéralisation faible dans l'ensemble. Celle-ci varie de 60 à 425 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (après élimination de deux valeurs plus élevées, reclassées de ce fait dans l'Eocène), avec une moyenne d'environ 190 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Cette faible minéralisation est tout-à-fait compatible avec la nature siliceuse dominante (sableuse) de l'aquifère. Elle permet de distinguer, avec une certaine fiabilité, les eaux du CT de celles de l'Eocène, plus minéralisées comme on va le voir. En revanche, elle ne permet pas de distinguer les eaux du CT de celles du Maastrichtien sous-jacent qui, du fait d'une lithologie semblable, ont un faciès identique.

Les 17 valeurs disponibles ont été reportées sur la carte récapitulative des données collectées sur le CT (cf. 4.4.1). Cette dernière ne montre aucune variation nette dans l'espace, de très faibles valeurs ($< 100 \mu\text{S}/\text{cm}$) pouvant se rencontrer aussi bien autour du Fleuve qu'à l'intérieur du Ferlo. Il en est de même pour les valeurs plus élevées. Il est alors probable que les variations soient plutôt liées à la profondeur captée au sein de l'aquifère. Les plus faibles valeurs pourraient ainsi correspondre à sa

²² Cette relation est couramment utilisée dans les rapports ou thèses ayant trait au Sénégal ; elle mériterait d'être précisée dans la gamme de salinités rencontrées en région de Matam

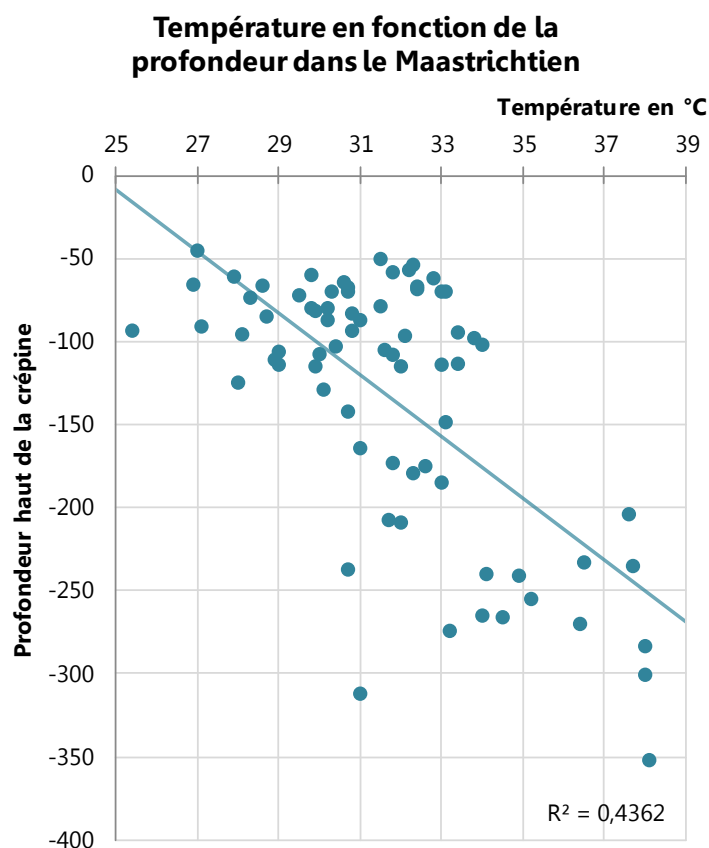
partie supérieure, comme semblent l'attester celles mesurées dans les puits. Le faible nombre de valeurs disponibles ne permet pas de mettre en évidence une quelconque évolution dans le temps.

4.5.2.2. Fer

La dizaine de valeurs obtenues varient de très faibles concentrations (< 0.1 mg/l) à fortes (3.5 mg/l), ce qui ne semble pas suffisant pour distinguer les eaux du CT de celles du Maastrichtien. La problématique d'ensemble du fer fera l'objet du chapitre 4.6.

4.5.3. Maastrichtien

4.5.3.1. Température



La température de l'eau des 76 forages mesurés attribués au Maastrichtien varie de 25.4°C à 38.1°C, la moyenne s'établissant à 31.6°C. Le graph ci-contre étudie l'évolution de la température avec la profondeur du captage, le repère retenu étant la cote du haut de la crépine. On voit que l'augmentation avec la profondeur, évolution logique, ne se dessine que de façon très imparfaite, puisque la corrélation n'est que faiblement significative. Les raisons en sont multiples : erreurs de mesure, influence de la durée du pompage et du débit, température extérieure, etc. Cependant, la température, si elle était mesurée de façon systématique sur des forages en pompage d'assez longue durée et avec un appareil de mesure suffisamment précis, pourrait constituer un indicateur valable de la profondeur d'origine de l'eau captée. Elle a d'ailleurs permis de corriger certaines erreurs d'affectation.

On dispose d'autre part, pour les forages rapportés au Maastrichtien, de 70 valeurs de pH mesurées in situ. Elles varient entre 5.9 et 7.4, avec une moyenne à 6.7. Compte tenu de la faible signification de ce paramètre, très sensible aux conditions du prélèvement (eau aérée ou non) et de sa mesure (précision médiocre des appareils), aucune interprétation détaillée ne sera tentée.

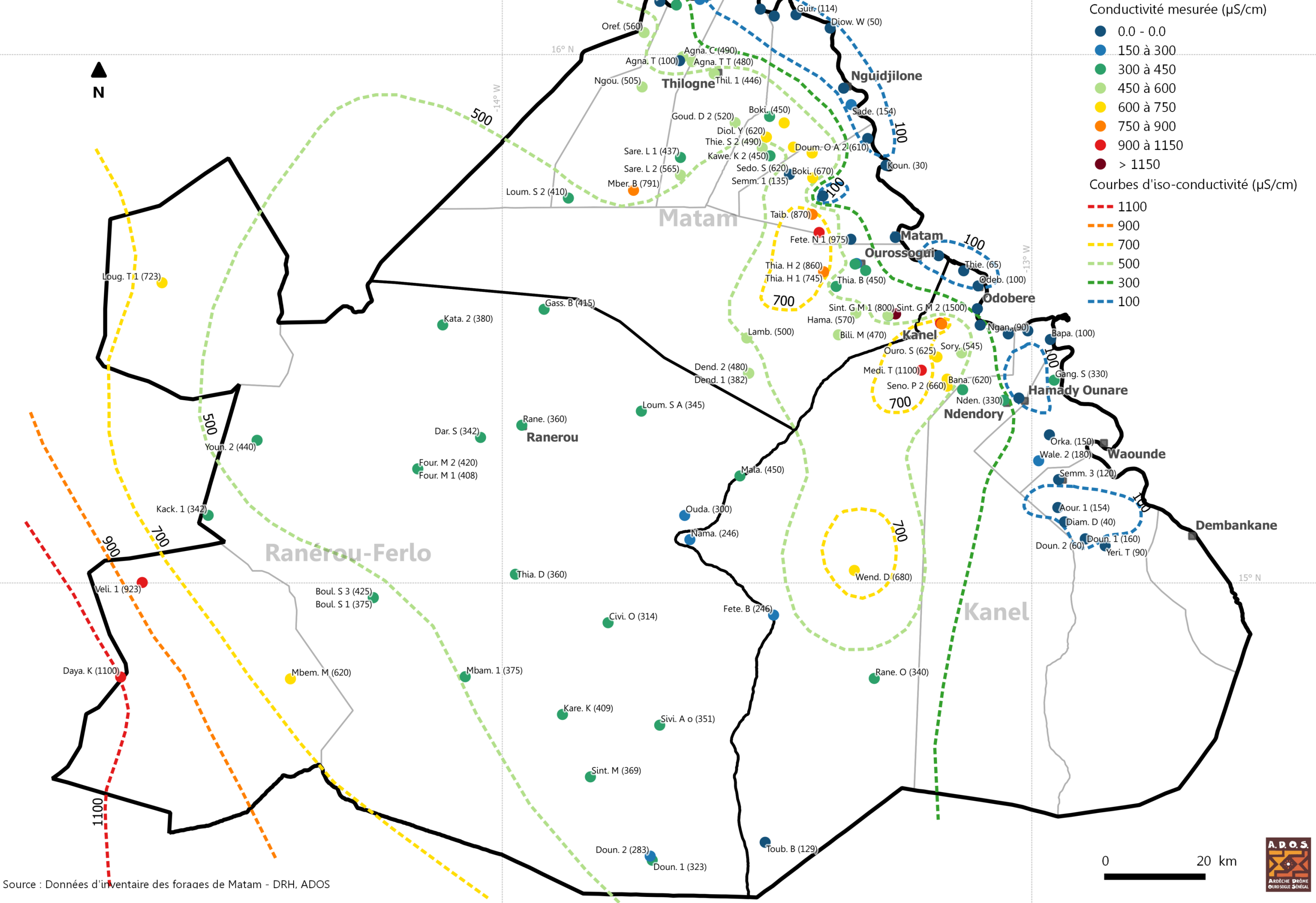
4.5.3.2. Conductivité

La conductivité constitue pour sa part un robuste indicateur de la minéralisation des eaux, pourvu qu'elle soit mesurée avec un appareil effectuant convenablement la correction du biais dû à l'influence de la température. Sur environ 80 valeurs mesurés, le minimum est de 50 $\mu\text{S}/\text{cm}^{23}$, le maximum de 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}^{24}$, la moyenne s'établissant autour de 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

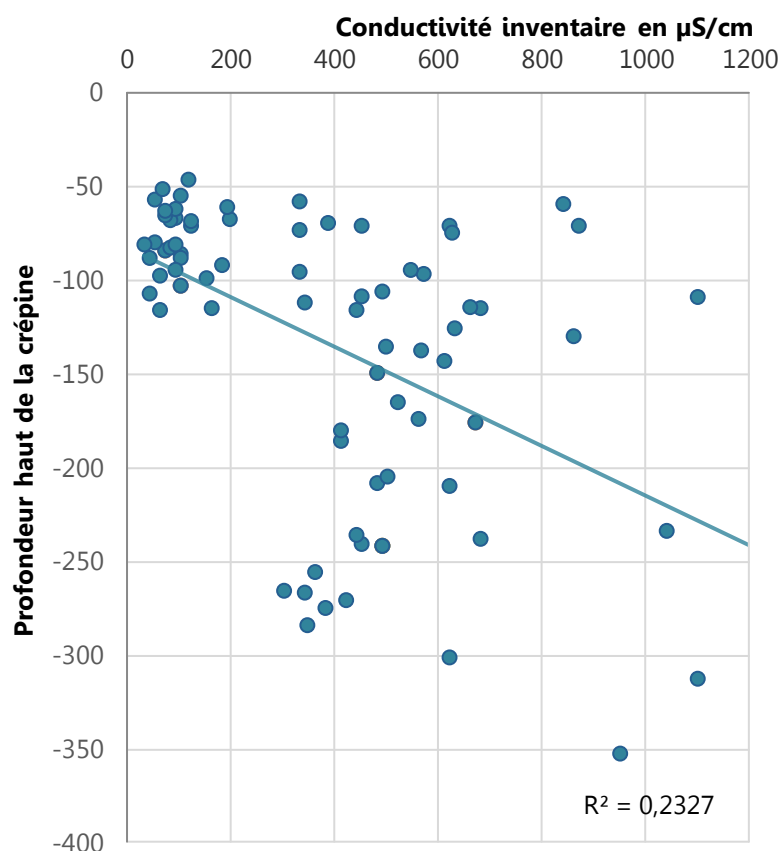
²³ Plusieurs valeurs inférieures à 75 $\mu\text{S}/\text{cm}$ semblent anormalement basses ; peut-être l'appareil de mesure manque-t-il de précision dans cette gamme ; elles sont en tous cas symptomatiques d'eaux en contact avec le Fleuve, ou au moins sa nappe alluviale

²⁴ Il s'agit d'un des forages privés de Sinthiou Garba, dont la profondeur supposée est de 90m, mais sur lequel on ne possède malheureusement pas d'indication précise

Conductivités mesurées dans le Maastrichtien



Conductivité en fonction de la profondeur dans le Maastrichtien



L'interprétation des différences dans la répartition des salinités de l'eau n'est pas évidente, d'importants contrastes étant relevés dans des forages parfois très proches.

Le premier graphique ci-contre tente de relier la conductivité à la profondeur du captage. Même si des groupements de points apparaissent, notamment avec une majorité des forages courts (< 120 m) qui présentent des eaux très peu minéralisées, il n'existe pas de corrélation significative.

Le report des valeurs sur la carte suivante est nettement plus parlant. On peut en effet distinguer :

- Une zone, apparemment discontinue, de très faible conductivité ($\leq 100 \mu\text{S/cm}$), axée sur le Dandé Mayo au nord, pouvant gagner le bord du Diéri au sud (Hamadi Ounaré, Aouré, Doundé). Tous les forages concernés sont des forages courts (haut des crépines entre 50 et 110m), et se situent dans la zone de montée du niveau piézométrique (cf. carte d'évolution des niveaux du Maastrichtien) présentant les évolutions des niveaux statiques du Maastrichtien. Ces « poches d'eau douce » sont donc un nouvel élément en faveur d'une recharge contemporaine, au travers des alluvions.
- Le reste du Walo et le rebord du Diéri renferment, au niveau du Maastrichtien, des eaux de faible minéralisation, de conductivité comprise entre 100 et 400 $\mu\text{S/cm}$, mais cette zone vient buter rapidement vers l'est sur une zone de conductivité supérieure à 500 $\mu\text{S/cm}$, et parfois à 700 $\mu\text{S/cm}$, avec des maxima relativement élevés : 870 $\mu\text{S/cm}$ à Taïba, 860 $\mu\text{S/cm}$ à Thiancone Hiraye, 840 $\mu\text{S/cm}$ à Kanel F3, jusqu'à 1100 $\mu\text{S/cm}$ à Medina Torobe²⁵.

Cette augmentation de salinité peut s'opérer sur de très courtes distances, par exemple entre Nabadji Civol, qui capte entre -64 et -75 m une eau à 70 $\mu\text{S/cm}$ et Taïba, qui capte entre -70 et -93 m une eau à 870 $\mu\text{S/cm}$, les deux forages n'étant distants que de 4 km. Nous n'avons aucune explication à ce phénomène, autre qu'une éventuelle intercalation locale d'une couche nettement plus minéralisée entre -75 et -93 m.

D'importants contrastes, symptomatiques d'une stratification dans la salinité, peuvent être également notés dans des forages distants de seulement quelques dizaines de mètres. C'est le cas pour les deux batteries notées ci-dessous.

²⁵ Ces 4 forages captant à des profondeurs comprises entre 60 et 140 mètres

Exemple de contrastes de conductivité à l'échelle locale

Forage	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Température ($^{\circ}\text{C}$)	Crépines (m)
Wendou Diohi F1	680	29.3	237 – 262
Wendou Diohi F2	1040	36.5	233 – 253
Ourossogui F1	190	29.8	60 – 85
Ourossogui F2	385	32.4	68 – 92
Ourossogui F3	330	29.5	72 - 95

A Wendou Diohi, le contraste des conductivités est important, entre deux ouvrages captant deux intervalles très proches, mais le paramètre température peut expliquer ce contraste : le pompage dans F2 appelle visiblement des eaux plus profondes, et celles-ci sont plus chargées. A Ourossogui, la cause des différences de conductivité est probablement la même : le F1, un peu plus court, capte des eaux moins minéralisées, tandis qu'entre F2 et F3, qui captent à peu près la même couche, c'est à nouveau la température qui semble indiquer que le pompage dans F2 mobiliserait des eaux plus profondes, un peu plus chargées.

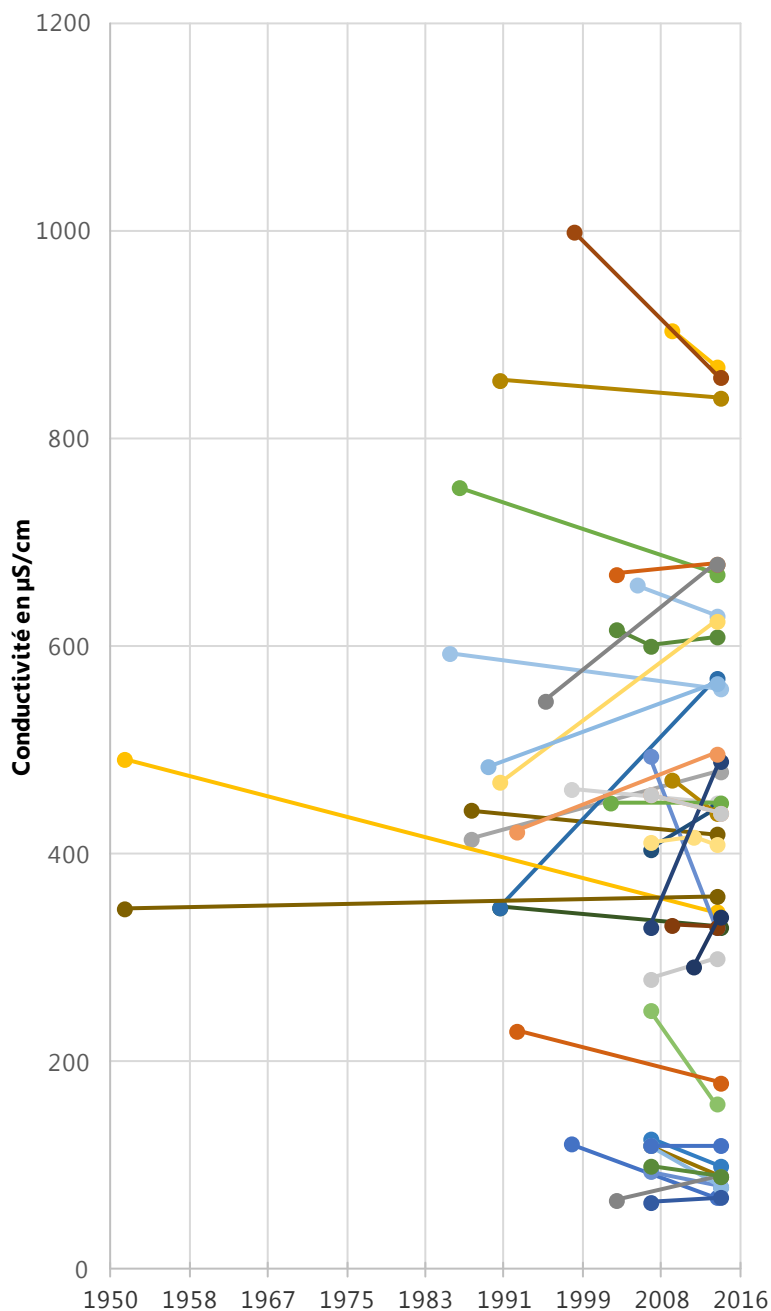
- Une zone centrale, allant de Katane au nord-ouest à Mbounguiel, où l'on retrouve des conductivités comprises entre 300 et 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, malgré des profondeurs captées allant de - 250 à plus de 400m (approfondissement du Maastrichtien sous le CT et le Paléocène),
- Et une augmentation assez rapide de la salinité vers l'ouest et le sud-ouest, qui passe de 620 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à Mbem Mbem à plus de 1100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au niveau de la limite de la région. Il faut noter, sans qu'il y ait forcément une relation de cause à effet, que cette augmentation a lieu dans la zone où commence à se développer le biseau salé à la base du réservoir d'eau douce.

En conclusion, on retiendra que la salinité est loin d'être homogène au sein du réservoir Maastrichtien, lui-même surmonté, quand il n'est pas en continuité avec un quaternaire très peu salé car en équilibre avec le fleuve, soit par un Eocène généralement plus salé, soit par un CT généralement moins salé que lui.

Il est probable que cette stratification au sein du réservoir se fasse dans le sens d'une augmentation de la salinité avec la profondeur, même dans les régions où la base de la formation n'est pas contaminée par des eaux sur-salées. Des investigations sur l'origine de ces variations s'avèreront de plus en plus nécessaires, dans la mesure où l'exploitation du réservoir à grande échelle mobilisera de plus en plus ses couches profondes.

4.5.3.2.2. Evolution dans le temps

Evolution de la conductivité dans le temps dans le Maastrichtien



Le graph ci-contre montre l'évolution de la conductivité entre une date « ancienne », correspondant généralement aux essais de production et une ou des dates récentes (tournées d'inventaire, ou pour deux ou trois points mesures DGPRES), sur une quarantaine de forages du Maastrichtien.

On note des augmentations et des baisses limitées de ce paramètre, ainsi que bon nombre de cas de stabilité. En fait, il est certain que la plupart des variations mises en évidence résultent, soit pour les mesures anciennes de la traduction en conductivité de mesures de résidu sec, soit pour l'ensemble des mesures, de biais liés au changement d'appareils, à la correction de température.

En conséquence, il semble qu'il faille conclure, en l'état actuel des connaissances, à une stabilité d'ensemble de la minéralisation de l'eau. Cependant, compte tenu de l'importance majeure que pourrait avoir une éventuelle tendance à l'augmentation, consécutive à la baisse des pressions, dans l'ouest de la région de Matam comme en région de Louga, il semble que le suivi des conductivités dans le réseau DGPRES doit être intensifié. Une campagne de mesure systématique des forages anciens, pour lesquels on possède des mesures dans les années 1950 à 1980, pourrait s'avérer très profitable.

4.6. Problématique du fer dissous

4.6.1. Rappels sur le fer

4.6.1.1. Causes de la présence du fer dans l'eau

Le fer est l'un des métaux les plus abondants de la croûte de la Terre (environ 5 % de sa composition) et se retrouve alors dans les eaux douces souterraines, à des concentrations comprises entre 0 à 50 mg/l. Son origine dans l'eau est donc naturelle, par dissolution de minéraux ferreux (pyrite) ou ferromagnésiens (micas) fréquents dans les roches anciennes, ou de nodules ferrugineux. La solubilité du fer dépend de nombreux paramètres et notamment du pH, de la turbidité ou encore de la teneur en oxygène dissous de l'eau.

4.6.1.2. Hydrochimie du fer

Dans les eaux souterraines dépourvues d'oxygène, le fer se trouve sous sa forme réduite Fe^{2+} , relativement instable. Dès qu'il se trouve en présence d'oxygène dissous, cet ion s'oxyde en Fe^{3+} , puis se transforme rapidement en hydroxyde ferrique $\text{Fe}(\text{OH})_3$ insoluble dans l'eau, qui précipite donc aussitôt. C'est cette forme qui est responsable de la coloration rougeâtre de l'eau, ainsi que de son goût.

Cette réaction en chaîne nécessitant la présence d'oxygène dissous, elle commence généralement dès le premier contact de l'eau d'exhaure avec l'air, c'est à dire au niveau du refoulement dans le réservoir, et à l'intérieur même du réservoir (château d'eau en général). Toutefois, certaines bactéries puisant leur énergie dans la réaction chimique d'oxydation du fer ferreux en fer ferrique, et certaines étant anaérobies, Fe^{3+} peut alors potentiellement se former avant la première aération.

4.6.1.3. Impacts sur la santé humaine

Le fer est un élément essentiel dans la nutrition humaine. Les estimations des besoins minimums quotidiens se situent entre 10 et 50 mg/j, mais dépendent de l'âge, du sexe, de l'état physiologique et la biodisponibilité du fer.

L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) ne définit pas de valeur guide pour le fer dissous dans l'eau potable, qu'elle considère comme « non préoccupant pour la santé aux concentrations normalement relevées dans l'eau de boisson »²⁶.

Par mesure de précaution contre le stockage de fer en excès dans le corps, le JECFA²⁷ a établi une dose journalière tolérable provisoire de 0,8 mg/kg de poids corporel, qui s'applique au fer de toutes les sources (à l'exception des oxydes de fer utilisés comme agents colorants et des suppléments de fer pris pendant la grossesse et l'allaitement ou pour les besoins cliniques spécifiques).

Si tant est que l'intégralité du fer consommée soit réellement absorbée, un adulte de 80 kg consommant quotidiennement 3 litres d'eau concentrée à 20mg/l atteindrait théoriquement cette limite (sans prendre en compte les autres apports en fer). En région de Matam, il existe à priori un seul ouvrage desservant une concentration en fer de cet ordre (Tekinguel F2), et cinq autres desservants des concentrations comprises entre 5 et 10 mg/l. Le goût et l'apparence de l'eau sont généralement un frein à la consommation humaine bien avant ces valeurs de concentration, à partir de 2 mg/l, si

²⁶ Directives pour la qualité de l'eau de boisson, OMS 2011

²⁷ Comité d'experts FAO/OMS sur les additifs alimentaires

bien que dans cette zone, ce sont souvent des puits captant la nappe phréatique, peu concentrée en fer, qui sont utilisés pour la consommation humaine.

En conclusion, si le fer n'a à ce jour pas d'effet direct prouvé sur la santé humaine, sa présence à de fortes teneurs a tendance à limiter l'utilisation pour la consommation humaine de l'eau distribuée, pourtant de bonne qualité bactériologique, au profit des ressources traditionnelles qui sont, elles, nettement plus contaminées, et donc à freiner indirectement le recul des maladies hydriques.

4.6.1.4. Impacts sur l'agriculture

4.6.1.4.1. Impacts sur l'abreuvement du bétail

A ce jour, il semble qu'aucun effet toxique directement lié à une surcharge de fer n'ait été enregistré chez les bovins. On considère donc que le risque de toxicité directement lié à la présence de fer est minime pour le bétail. Toutefois, des quantités élevées de fer dans l'eau d'abreuvement peuvent avoir des effets métaboliques secondaires :

- le fer peut altérer la saveur de l'eau et éventuellement entraîner une diminution de l'abreuvement
- une ingestion excessive de fer peut avoir des effets néfastes sur le métabolisme de plusieurs autres nutriments essentiels en interférant avec la biodisponibilité d'autres métaux tels que le cuivre, le zinc, le magnésium, le manganèse ou le calcium, occasionnant potentiellement des carences.²⁸

4.6.1.4.2. Impacts sur l'irrigation

La présence de fer au moins jusqu'à des concentrations de l'ordre de 2 mg/l est décrite comme favorable à la croissance des végétaux. Elle se révèle en revanche particulièrement dommageable pour les systèmes de micro-irrigation, pour des raisons évidentes de colmatage des capillaires et des goutteurs.

4.6.1.5. Impacts sur les installations hydrauliques

4.6.1.5.1. Impact sur le forage, la pompe et la colonne de refoulement

En amont de la première aération de l'eau, les impacts du fer sur les équipements hydrauliques sont étroitement liés à la présence de bactéries anaérobies du fer (siderocapsaceae) tirant leur énergie de l'oxydation de Fe^{2+} et Fe^{3+} .

Ces bactéries du fer trouvent leurs conditions de croissance optimales dans les eaux dont le pH est compris entre 5.5 et 7.2, et dont la concentration en fer s'établit entre 0.2 mg/l et 3 mg/l, soit potentiellement dans 47 % des ouvrages de la région.

Leur développement se traduit par la formation de dépôts colloïdaux ferrugineux, de type boue gélatineuse, dans les ouvrages, pouvant provoquer des phénomènes de colmatage de crépines de forage et de pompe, avec un impact potentiellement important sur la productivité. Selon les contextes physico-chimiques (pH, température), l'activité bactérienne peut également induire des phénomènes de corrosion (pompe, conduites) et/ou de dépôts provoquant alors des colmatages (crépines, colonne de refoulement).

²⁸ Boyne et Arthur, 1986

4.6.1.5.2. Impact sur l'ouvrage de stockage

L'oxydation des sels ferreux, accélérée ou non par des bactéries aérobies, débute quant à elle au premier contact avec l'air, c'est-à-dire dans le réservoir. Il y a alors, si le temps de séjour dans le réservoir le permet, une première précipitation d'hydroxydes ferriques dans le fond de celui-ci. Les dépôts produits peuvent atteindre plusieurs centimètres d'épaisseur en quelques mois, obligeant le gestionnaire à procéder à plusieurs nettoyages complets du réservoir chaque année. Ce type d'entretien permet d'éliminer une partie du problème. Toutefois, si la configuration du réservoir n'est pas optimale (pas de réserve entre la conduite de sortie du château d'eau et le fond de la cuve permettant de stocker les sédiments) et que le réservoir est totalement vidangé, une partie des dépôts peut être entraînée dans le réseau de distribution.

4.6.1.5.3. Impacts sur le réseau de distribution et les compteurs

Au même titre qu'au niveau des crépines de forage et de pompe, la formation de dépôts ferrugineux produits par les bactéries du fer peut avoir des impacts importants sur les canalisations du réseau de distribution, par colmatage, obstruction voire corrosion. L'entraînement et le relargage dans les réseaux de dépôts formés dans le château accentuent encore le problème. Les compteurs sont aussi touchés par ces dépôts, en particulier les compteurs à cadran noyé, les moins onéreux et donc souvent ceux privilégiés par les ASUFOR. Il peut en effet suffire d'un mois pour que la lecture d'un compteur ne soit plus possible, nécessitant des nettoyages répétés et rendant les comptages approximatifs. L'utilisation de compteurs de type cadran sec réglerait potentiellement le problème de comptage mais ceux-ci s'avèrent 2 à 3 fois plus coûteux et ne sont pas toujours disponibles en région de Matam.



Eléments de pompes immergées - Kanel
(Source : ADOS)



Château d'eau - Sinthiou Garba
(Source : Aquassistance)



Colonne de refoulement – Seno Palel
(Source : ADOS)

4.6.2. Le fer dans les forages de la région de Matam

4.6.2.1. Difficultés dans la quantification du fer

Compte tenu de son instabilité, le fer est un élément relativement difficile à doser. Plus exactement, dans la recherche de la mise en évidence de sa concentration réelle, on se heurte à deux types de problèmes :

- Sa grande variabilité dans l'espace et dans le temps, d'abord au niveau des captages, puisque la concentration en fer varie dans de fortes proportions selon le point et le moment du prélèvement d'une même eau. Ensuite, comme on le verra plus loin, il est possible qu'une importante variabilité existe également au sein des aquifères eux-mêmes ;
- Son instabilité physico-chimique, les échantillons prélevés sans préparation spéciale aux fins d'analyse de laboratoire fournissant des résultats systématiquement erronés.

Ceci explique pourquoi de nombreux rapports indiquent des concentrations en fer faibles à nulles, alors que celles-ci sont souvent élevées, voire très élevées quand elles sont dosées rapidement sur le terrain.

4.6.2.1.1. Incidence du point de prélèvement

Lors des campagnes d'inventaire, il a été constaté que la grande majorité des ouvrages n'étaient équipés d'aucun piquage muni d'un robinet permettant de prélever l'eau brute, en sortie de pompe (cf. 2.1.7.2). Dans de nombreux cas, un échantillon a cependant pu être recueilli en amont du stockage, en dévissant un manomètre, en prélevant sur le refoulement à l'intérieur du château d'eau ou

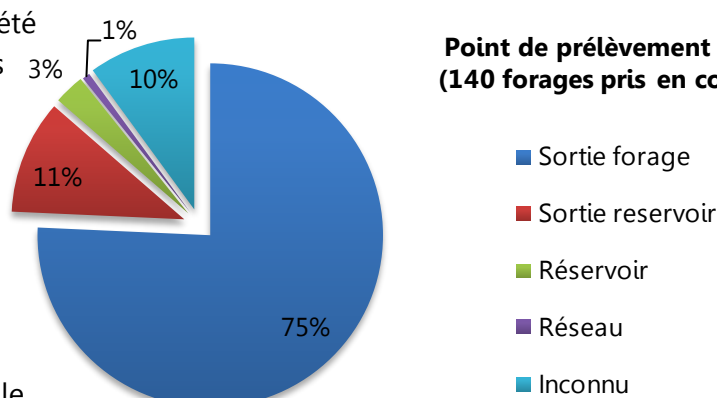
en bénéficiant d'une fuite ; mais pour environ 15 % des échantillons, il a fallu se contenter d'un prélèvement fait en sortie du réservoir (ou dans le réservoir lui-même).

Pour environ 10 % des mesures faites dans le cadre de la toute première campagne d'inventaire, le lieu du prélèvement n'a pas été consigné. Ce n'est en effet qu'après la campagne de 2012, à l'occasion d'un premier dépouillement, qu'il est devenu clair que ces mesures faites en sortie de réservoir, indiquant généralement des concentrations nettement assez faibles, n'étaient pas représentatives de la réelle concentration en fer de la ressource ; celui-ci s'était déjà partiellement déposé dans le réservoir après l'aération de l'eau²⁹.

L'abattement induit par le transit dans le réservoir peut-être illustré par deux observations :

- par la probabilité d'obtenir une concentration en fer plus importante en sortie de forage, toutes situations confondues : le nombre de cas où la concentration dépasse 1 mg/l est de 55 sur 108 (51 %) pour les échantillons prélevés en sortie de forage, et seulement de 11 sur 30 (37 %) pour les autres échantillons (réservoir + réseau + indéterminés) ;

**Point de prélèvement d'eau
(140 forages pris en compte)**



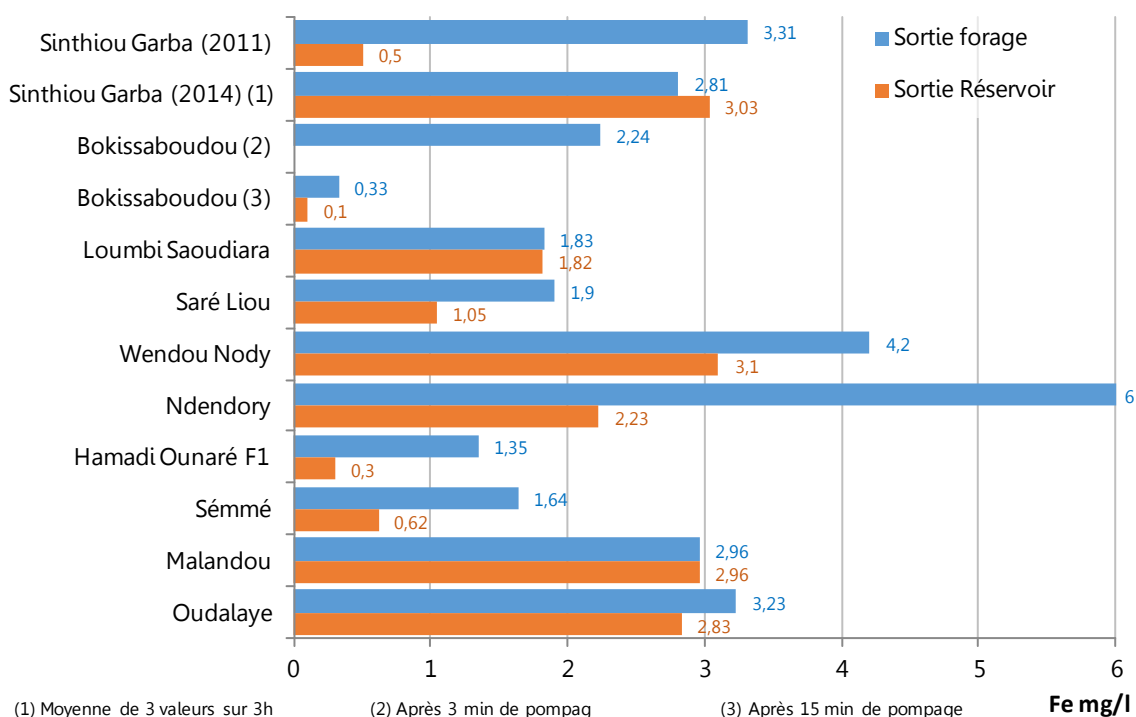
²⁹ Quand l'eau est prélevée, en l'absence de robinet, par dévissage d'un appareil, il est possible que les échantillons récupérés à partir du brouillard de fines gouttelettes soient également affectés d'une précipitation accélérée dans le gobelet, du fait de l'intense aération de l'eau, etc.

- de façon plus nette, par l'abattement réel obtenu dans un certain nombre de cas où l'on a pu mesurer la même eau, le même jour, aux deux points critiques :

Dans la majorité des cas, le transit dans le réservoir se traduit par un abattement notable de la concentration (Sinthiou Garba 2011, Ndendory, Hamadi Ounaré, Semme).

Cependant, dans certains cas, il ne semble pas y avoir d'abattement, voire même une légère augmentation : cela provient alors des conditions de séjour dans le réservoir (avec par exemple un entraînement, en fond de réservoir, de la couche de fer déposée depuis le dernier nettoyage). Des exemples seront fournis ci-après dans l'analyse des variations dans le temps. La prise en compte, dans l'interprétation des résultats, du point de prélèvement paraît donc essentielle, d'où la recommandation faite aux services compétents d'exiger à l'avenir la pose d'un système de prélèvement sur tout nouveau forage (cf. 5.1.2.2 et recommandation 4).

Comparaison de mesures de fer en fonction du point de prélèvement



Effet du transit dans le réservoir

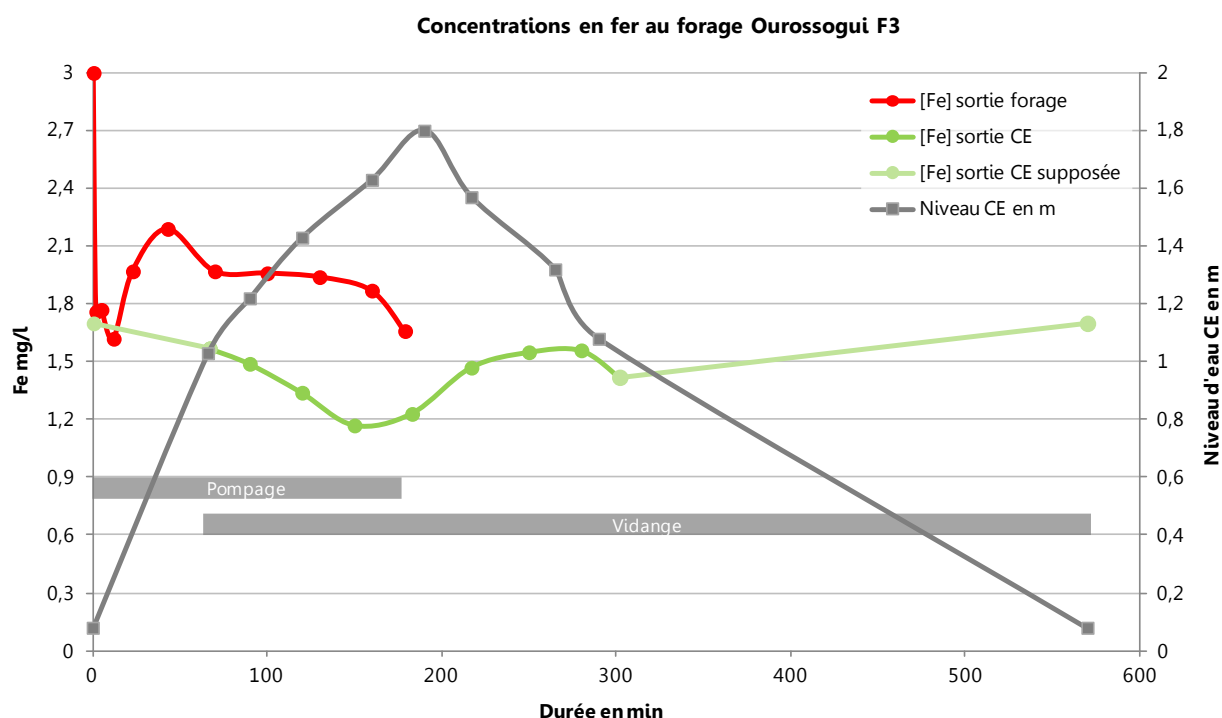
Deux opérations de suivi des concentrations sur un cycle de pompage permettent de mieux apprécier l'incidence du transit dans le réservoir, dont on vient de voir qu'elle se caractérisait par des abattements très variables.

Le premier concerne le forage Oourossogui F3, pour lequel la figure ci-dessous présente les résultats d'un suivi sur 10 heures. On voit que durant le pompage (3h de durée) la concentration a varié de 3 à 1.6 mg/l, avec une moyenne pondérée de 1.9 mg/l.

Après la baisse des premières minutes, peut-être due à la simple vidange de la colonne d'exhaure, les variations constatées pourraient provenir de l'appel d'eaux successivement plus ou moins chargées au sein de l'aquifère.

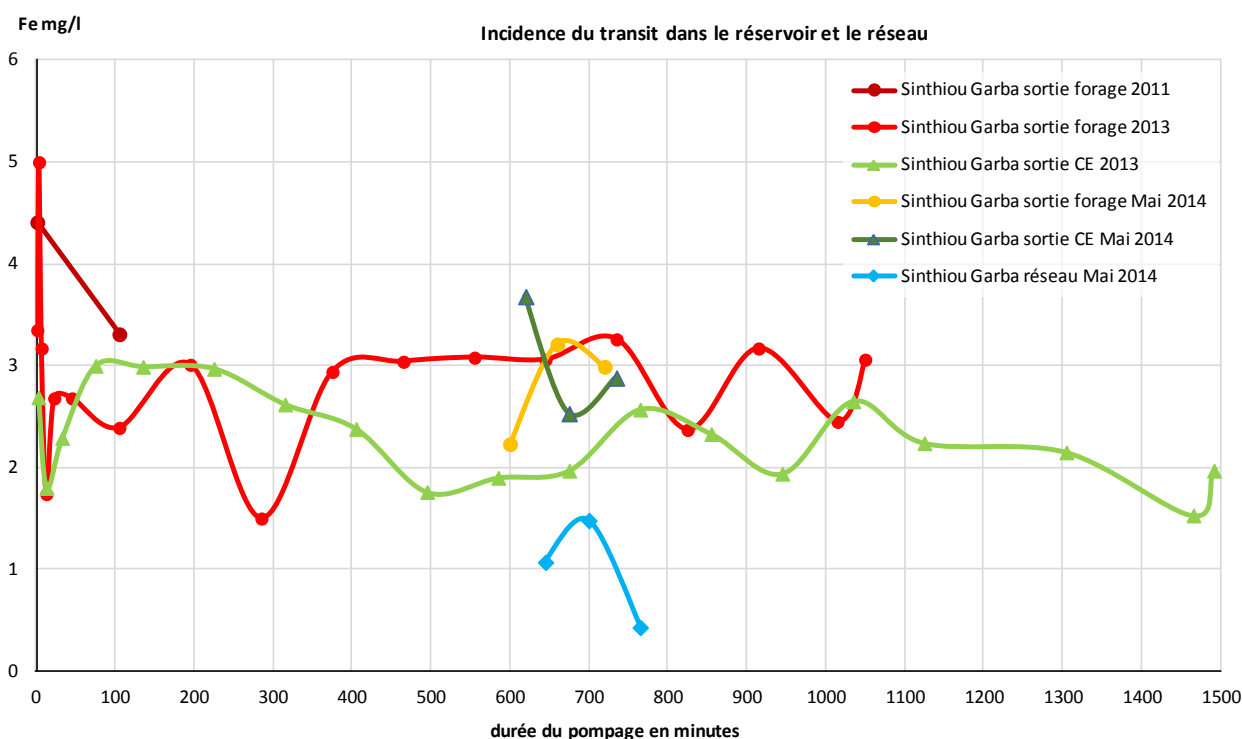
La période de vidange du réservoir est complexe à analyser, parce qu'entre la 70^{ème} et la 190^{ème} minutes il y a superposition du pompage et de la vidange, puis vidange proprement dite. Pendant toute la période de suivi, la concentration a varié de 1.6 à 1.2 mg/l, avec une concentration moyenne pondérée de 1.40 mg/l, ce qui correspond à un abattement moyen de la concentration de 28 %. On

peut faire par ailleurs l'hypothèse que la fin de la vidange (non suivie) se traduise par une augmentation de la concentration, lorsque l'on approche du fond du réservoir.



D'autres suivis ont été réalisés sur le forage de Sinthiou Garba, avec des résultats divers. Sur celui de 2013 (figure ci-après), la concentration moyenne pondérée en sortie forage sur une durée de pompage de 18h est de 2.9 mg/l. Celle obtenue en sortie de château d'eau n'est que de 2.24 mg/l, ce qui représente un abattement de 23 %.

En Mai 2014, lors d'un bref essai, les concentrations en sortie forage et en sortie de réservoir sont restées globalement identiques, autour d'une moyenne de 3 mg/l..



En conclusion, il est maintenant certain que le transit de l'eau - plus ou moins aérée - dans le réservoir provoque la précipitation d'une fraction notable du fer dissous. Les conditions d'exploitation des ouvrages (durée des pompages et des vidanges, temps de séjour de l'eau qui en résulte, fréquence des nettoyages du réservoir, durée écoulée depuis le dernier nettoyage, etc.) sont donc susceptibles de modifier fortement les concentrations, et donc de compliquer leur représentativité.

Mais dans le même temps s'ouvre un domaine de recherche prometteur qui pourrait faire l'objet d'une suite à ce présent diagnostic, susceptible d'apporter des réponses, aux moins partielles, à la question du fer. Celui de la recherche des possibilités d'abattement des concentrations par :

- une modification des pratiques d'exploitation,
- une modification de la conception des réservoirs (notamment les châteaux d'eau),
- une modification des branchements (par exemple, spécialisation des châteaux d'eau aux seuls besoins d'eau potable).

Effet du transit dans le réseau

La précipitation du fer se poursuit dans les réseaux, avec deux effets principaux :

- Un colmatage, qui n'est vraisemblablement pas uniforme, mais se manifeste surtout dans les tronçons où la vitesse de l'eau est faible, ou en des points singuliers tels que les compteurs
- Un abattement de la concentration, lui aussi très variable, puisqu'il dépend justement de cette précipitation ; mais comme la quantité de fer précipitée dans le réseau ne peut en sortir qu'à l'occasion d'opérations de nettoyage, très rarement pratiquées à ce jour (sauf au niveau des compteurs ou lors d'opérations de rénovation), il existe fatalement des remises en suspension des dépôts, marqués par des turbidités et des concentrations très élevées

Les mesures effectuées sur le réseau de Sinthiou Garba en sont l'illustration.

On relève des abattements de concentration considérables sur certains points du réseau (mosquée, cimetière), une augmentation frappante en d'autres (collège) engendrant probablement des problèmes de colmatage. Notons que les fortes concentrations s'accompagnent d'une turbidité élevée, probablement due à du fer particulaire déjà oxydé. Une autre campagne de mesure du fer effectuée parallèlement en sortie de forage³¹, sortie de réservoir et sur un branchement (périmètre maraîcher) dont les résultats sont présentés sur le graphique précédent mettent aussi en évidence un abattement notable en réseau, avec une moyenne de 1 mg/l au niveau du périmètre maraîcher, à comparer aux 3 mg/l mesurés en sortie de forage et de réservoir dans le même temps.

Mesures de fer et turbidité à Sinthiou Garba³⁰

Lieu de prélèvement	Fe mg/l	Turbidité NTU
Sortie CE	0.5	25
Mosquée	0.5	5
Collège	7.5	50
Cimetière	1.0	25

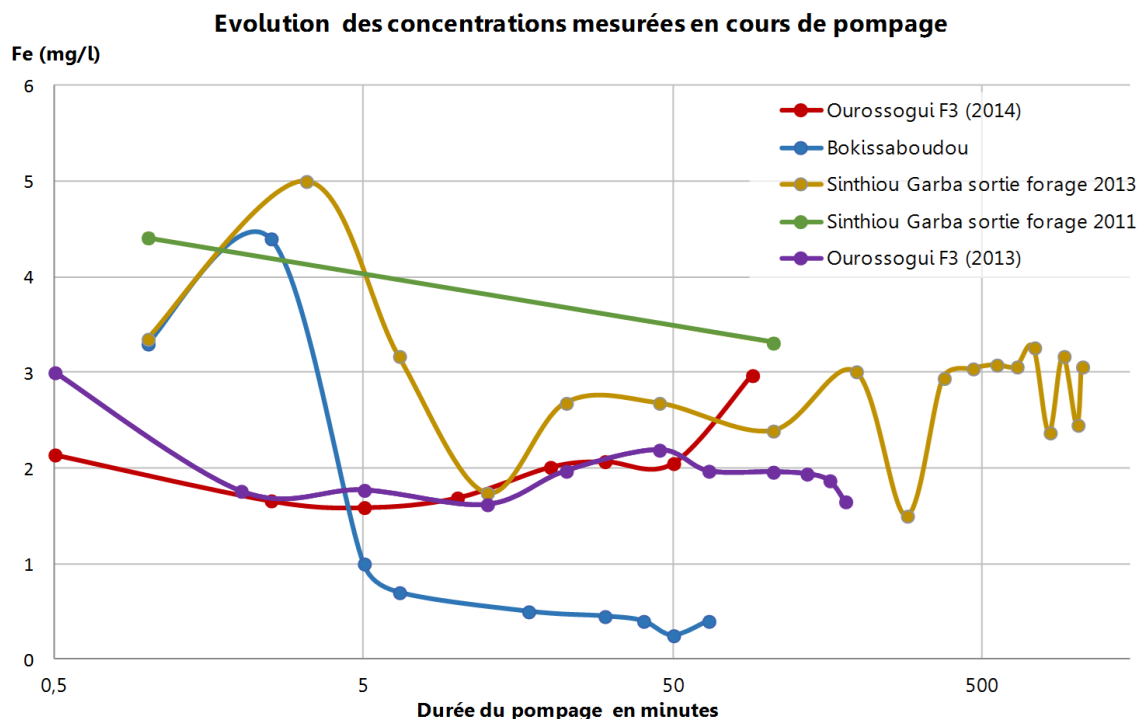
Ici encore, une réflexion sur la structure des réseaux, avec introduction d'organes de chasse, pourrait s'avérer très profitable.

³⁰ Mesures AQUASSISTANCE d'Avril 2011

³¹ Mesures DRH / ADOS de mai 2014

4.6.2.1.2. Incidence de la durée de pompage

Ce premier dépouillement des données recueillies a également permis de constater que plusieurs prélèvements successifs, effectués au même point, pouvaient fournir des résultats assez contrastés. Indépendamment des techniques de mesure (qui seront évoquées au chapitre suivant), il a semblé alors logique de suspecter des variations dans le temps, dues en particulier aux conditions d'aération et au temps de séjour, mais aussi peut-être au régime du pompage lui-même.



Pour donner plus de visibilité au graph, la durée du pompage est exprimée en échelle logarithmique. On voit que les évolutions peuvent être assez différentes :

- Sur Ourosogui F3 : tendance à la baisse avec le temps en 2013, mais légère augmentation en 2014
- Sur Sinthiou Garba : baisse légère en 2011, remontée rapide, suivie d'une forte baisse. Le suivi le plus complet, effectué en continu sur 18h en 2013, révèle une augmentation initiale (de 3.3 à 5 mg/l), suivie d'une chute en dessous de 2 mg/l, puis d'une lente remontée vers 3 mg/l, au cours de laquelle peuvent encore s'effectuer de notables variations.
- Sur Bokissaboudou : on passe de 4.5 mg/l après 3 minutes de pompage à 1 mg/l la minute suivante, puis l'on observe une décroissance jusqu'à 2.5 - 3 mg/l.

Nous déduisons de ces observations :

- D'abord la relativité des mesures isolées, qui constituent cependant l'essentiel de notre bagage : ces mesures isolées ne fournissent finalement qu'un ordre de grandeur, susceptible de varier parfois fortement, avec la durée du pompage
- Ensuite, et ce résultat est important, que dans au moins deux cas sur cinq il existe un pic de concentration dans les minutes qui suivent le démarrage de la pompe. A Bokissaboudou, la masse de fer pompée dans les 4 premières minutes du pompage représente 35 % de la masse totale pompée en 65 minutes. Mais à Sinthiou Garba, celle pompée pendant les 5 premières minutes représente moins de 1 % du total pompé sur 18 heures.

En conséquence, à Bokissaboudou, le by-passage des premières minutes du pompage vers une autre destination que le château d'eau permettrait déjà d'abattre la quantité de fer envoyée dans celui-ci de

35 %. Et ce type de mesure de gestion, extrêmement facile à mettre en œuvre, pourrait améliorer sensiblement la situation sur d'autres forages où le même type de mesures n'a pas été effectué.

4.6.2.1.3. Incidence de la méthodologie de mesure

La méthode de dosage la plus classique et la plus précise est le dosage en laboratoire. Cependant, pour éviter la précipitation du fer dans le flacon entre le prélèvement et l'analyse, ce dernier doit se faire à $\text{pH} < 5$, nécessitant l'ajout préalable d'acide dans le flacon, et l'analyse dans un délai limité après le prélèvement.

Certaines analyses anciennes, qui fournissent de fortes concentrations en fer en région de Matam, ont certainement été effectuées selon ce protocole. Malheureusement, depuis les années 1980 jusqu'à aujourd'hui, la plupart des analyses ont été effectuées sans cette précaution, aboutissant à des concentrations nulles à très faibles dans des eaux où les analyses de terrain de l'inventaire révèlent des concentrations moyennes à très élevées.

Il existe en effet aujourd'hui des matériels portatifs suffisamment simples et fiables pour effectuer des analyses directement sur le terrain, et s'affranchir ainsi de ce protocole. Certains de ces matériels, plus ou moins sophistiqués, peuvent fournir des résultats précis.

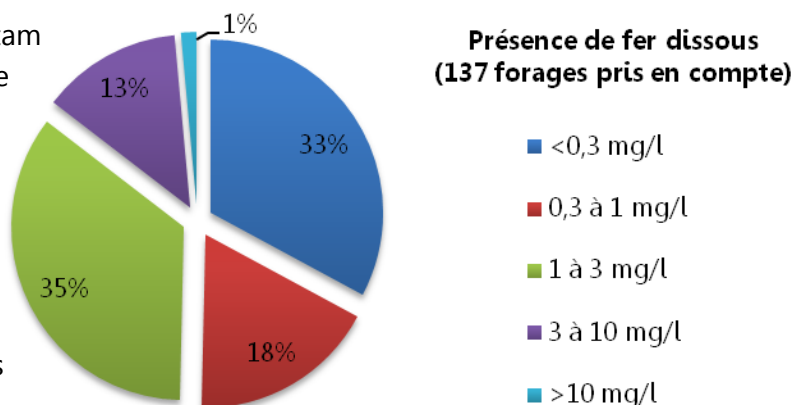
Pour les besoins de cet inventaire, qui nécessitait des mesures nombreuses mais pas nécessairement très précises (l'objectif restant du domaine du diagnostic), nous avons choisi d'utiliser un matériel rustique et bon marché :

- Des bandelette de prédétermination QUANTOFIX®, permettant une première évaluation dans la gamme 0 à 100 mg/l (0 - 2 - 5 - 10 - 25 - 50 - 100 mg/L).
- Un mini-photomètre portable HANNA®, permettant une évaluation plus précise (± 0.1 mg/L) dans la gamme 0 à 5 mg/l.

Cet équipement permet des évaluations qui doivent être valables, dans les conditions du terrain, à 20 % près, ce qui est largement suffisant dans l'objectif recherché. Aucune analyse n'a été faite en laboratoire dans le cadre des campagnes de terrains récentes.

4.6.2.2. Répartition géographique du fer en région de Matam

La problématique du fer en région de Matam était peu connue avant les campagnes de terrains récentes. La présence de fer était fortement soupçonnée dans un certain nombre d'ouvrages où ses effets sont manifestes (dépôt rouge sur les fuites de cuve de réservoir ou de canalisation, cadran de compteurs obstrués, couleur et goût de l'eau) mais les mesures n'étaient pas généralisées.



A l'heure actuelle, 138 des 156 ouvrages exploités disposent d'au moins une mesure de fer dissous récente, permettant de se rendre compte de l'ampleur du phénomène. Dans l'idéal, cette mesure de fer a été faite en sortie de forage, pour s'affranchir du phénomène d'abattement de la concentration provoqué par l'aération de l'eau mais des contraintes techniques sur les installations n'ont pas toujours permis ce prélèvement direct.

En considérant l'ensemble de ces mesures, quel que soit l'emplacement du prélèvement, on note que le fer n'est pas un problème pour un peu plus d'1/3 des ouvrages qui présentent des concentrations inférieures à 0.3 mg/l, et un problème modéré pour 18 % des ouvrages présentant des concentrations comprises entre 0.3 et 1 mg/l.

Pour 1/3 des forages, les concentrations varient de 1 à 3 mg/l. Le problème du vieillissement prématuré des installations d'exhaure et de distribution se pose alors réellement. Le goût et la coloration potentiels de l'eau peuvent devenir un frein à certains usages (boisson, cuisson, lessive).

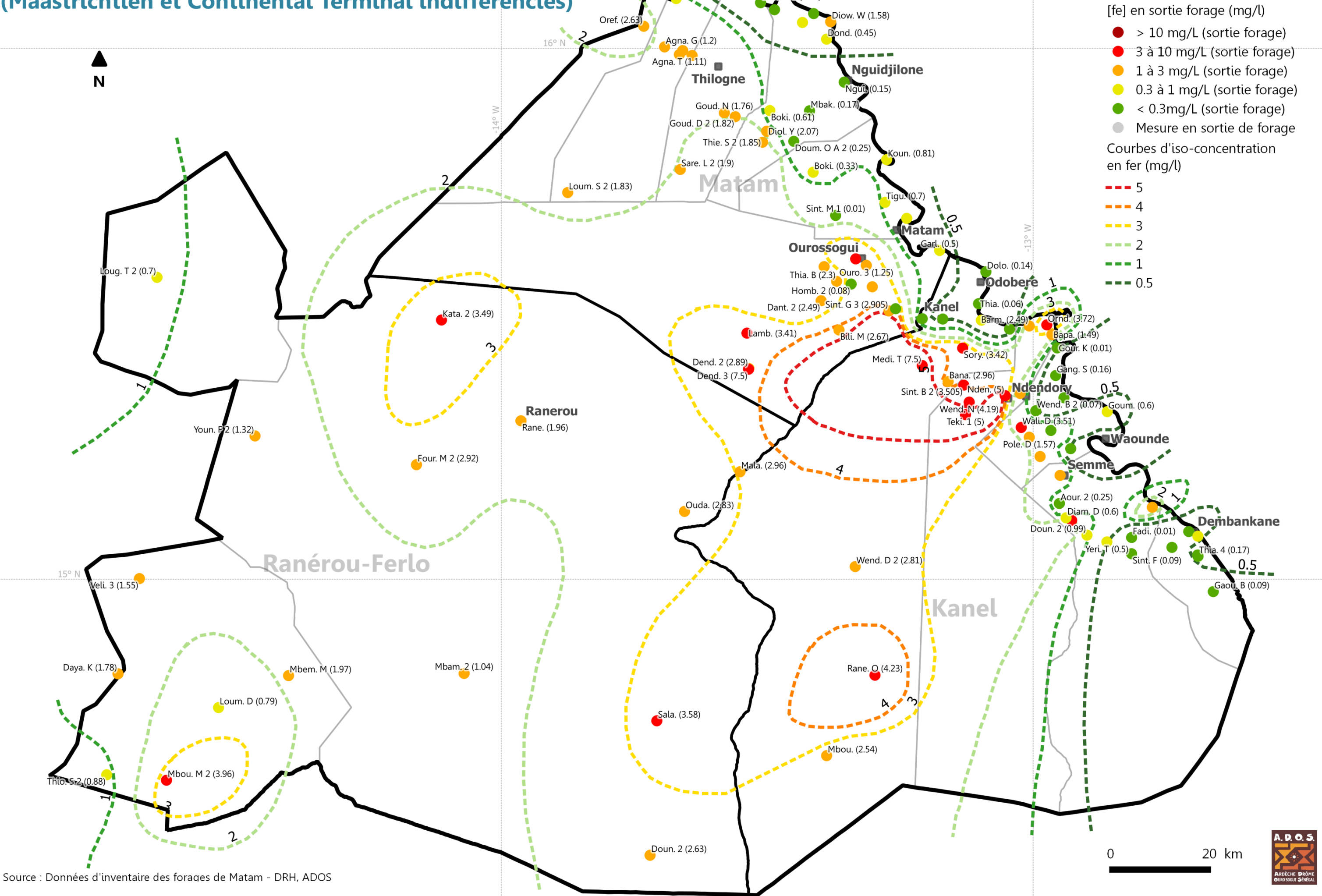
Enfin, environ 13 % des ouvrages sont touchés par le fer à des teneurs supérieures à 3 mg/l, valeur au-delà de laquelle la consommation humaine est souvent reportée sur d'autres ressources, si tant est qu'elles existent. Quatre forages desservent une eau concentrée à 5 à 10 mg/l (Tekinguel F1, Ndendory, Medina Torobe, Dendoudy F3). A l'extrême, la concentration en fer dosée à Tekinguel F2 avoisinait les 20 mg/l.

A l'échelle du territoire régional, et en ne considérant que les prélèvements réalisés en sortie de forage, on observe quelques tendances :

- la zone du Dandé Mayo se caractérise par les plus faibles concentrations en fer, généralement inférieures à 0.3 mg/l, parfois comprises entre 0.3 et 1 mg/l ; un groupe de 3 forages fait exception avec des valeurs comprises entre 1.5 et 3.7 mg/l (Barmatial, Orndolde et Bapalel), qui prolongent jusqu'au Fleuve la zone de Medina Torobe - Tekinguel, siège des plus fortes concentrations. Font également exception le forage d'Adabere 20 km plus au sud, et celui de Matam F2 dont on reparlera plus bas.
Rappelons que l'ensemble des forages du Dandé Mayo, y compris ces exceptions, sont peu profonds (généralement < 100 m, souvent < 75 m).
- Le Diéri, zone qui concentre le plus grand nombre de forages, s'avère être une zone très hétérogène. S'y côtoient, à des distances relativement faibles, des concentrations très faibles à très élevées. Par exemple, seuls 15 Km séparent le forage de Wendou Bosseabe F2 (< 0.3 mg/l) de celui de Tekingel F2 (> 20 mg/l).
Les concentrations dans cet axe parallèle au Fleuve sont en général supérieures à 1 mg/l, mais toujours avec des contrastes frappants d'un ouvrage à l'autre. Il se détache cependant une zone centrale très chargée (≥ 3 mg/l), axée sur Ouro Sidy – Medina Torobe – Ndendory – Tekinguel, mais se prolongeant aussi bien vers le Nord-Est (Orndolde) que vers le Nord (Sinthiou Garba), l'Ouest (Dendoudy) et le Sud (Ranéro Oriental).
- Le Ferlo oriental conserve des concentrations élevées, comprises entre 1.5 et 4 mg/l (avec la prolongation vers le sud-ouest de l'axe Orndolde-Tekinguel), mais celles-ci décroissent progressivement vers l'ouest pour atteindre des valeurs proches de 1 mg/l, voire inférieures, à l'exception de deux poches, l'une axée sur Mboundoum Baba, l'autre sur Katane).

Fer dissous dans les forages de la région de Matam

(Maastrichtien et Continental Terminal indifférenciés)



4.6.2.3. Analyse et facteurs explicatifs possible des hétérogénéités

4.6.2.3.1. Aquifères et lithologie

Comme on l'a vu au chapitre 4, il ne semble pas exister de critère net de distinction entre les eaux du Continental Terminal et celles du Maastrichtien en ce qui concerne la concentration en fer. L'explication est probablement à rechercher dans la lithologie, qui est très voisine pour ces deux formations détritiques dont l'essentiel des matériaux constitutifs proviennent de l'érosion de la même roche mère, le socle granitique. Cette érosion s'est produite en outre dans des conditions climatiques analogues, avec notamment production de cuirasses et de nodules ferrugineux, voire de pyrite, qui sont parfois signalés dans les coupes géologiques des forages. En revanche, l'Eocène possède généralement un faciès lithologique distinct, argilo-calcaire, passant à des calcaires francs dans ses parties aquifères. Et il semblerait (ceci restant à vérifier par la réalisation d'un plus grand nombre d'analyses dans cette formation) que ses eaux soient exemptes de fer, ou alors à de très basses concentrations. Une exception : le forage de Doundou, avec 0.45 mg/l (sortie forage), mais il est possible que ce captage, situé dans le Dandé Mayo, capte en fait la partie supérieure du Maastrichtien.

4.6.2.3.2. Profondeur et stratification

Si l'on admet l'hypothèse selon laquelle la concentration en fer varie avec la lithologie, le réservoir Maastrichtien constituant, avec le CT qui le surmonte, un système multicouches stratifié, il semble logique d'envisager que certaines couches puissent s'avérer plus chargées en fer que d'autres. Et que l'on puisse ainsi par exemple, déceler une augmentation avec la profondeur, ou un regroupement de valeurs fortes (ou faibles) dans certaines couches captées. Le graphique suivant, qui superpose les valeurs de fer mesurées (en se limitant aux seuls prélèvements en sortie de forage) aux intervalles captés montre qu'a priori il n'en est rien. Il fait apparaître les tendances suivantes :

- même si une grande partie des forages à faible concentration sont des forages courts (< 100 m), on trouve tout de même quelques unités avec des concentrations notables (≥ 3 mg/l) dans le parc de captages de moins de 100 m de profondeur
- les forages courts sont tous situés dans le Dandé Mayo (ou le Diéri), et le facteur explicatif serait alors plutôt la localisation que la profondeur
- les variations des concentrations, souvent spectaculaires sur de courtes distances, restent inexpliquées. L'exemple le plus frappant est celui des deux forages de la commune de Matam ; distants de seulement une centaine de mètres, les deux ouvrages sont de construction identique, et captent à peu près les mêmes niveaux, attribués au Maastrichtien supérieur.

Mesures de fer à Matam

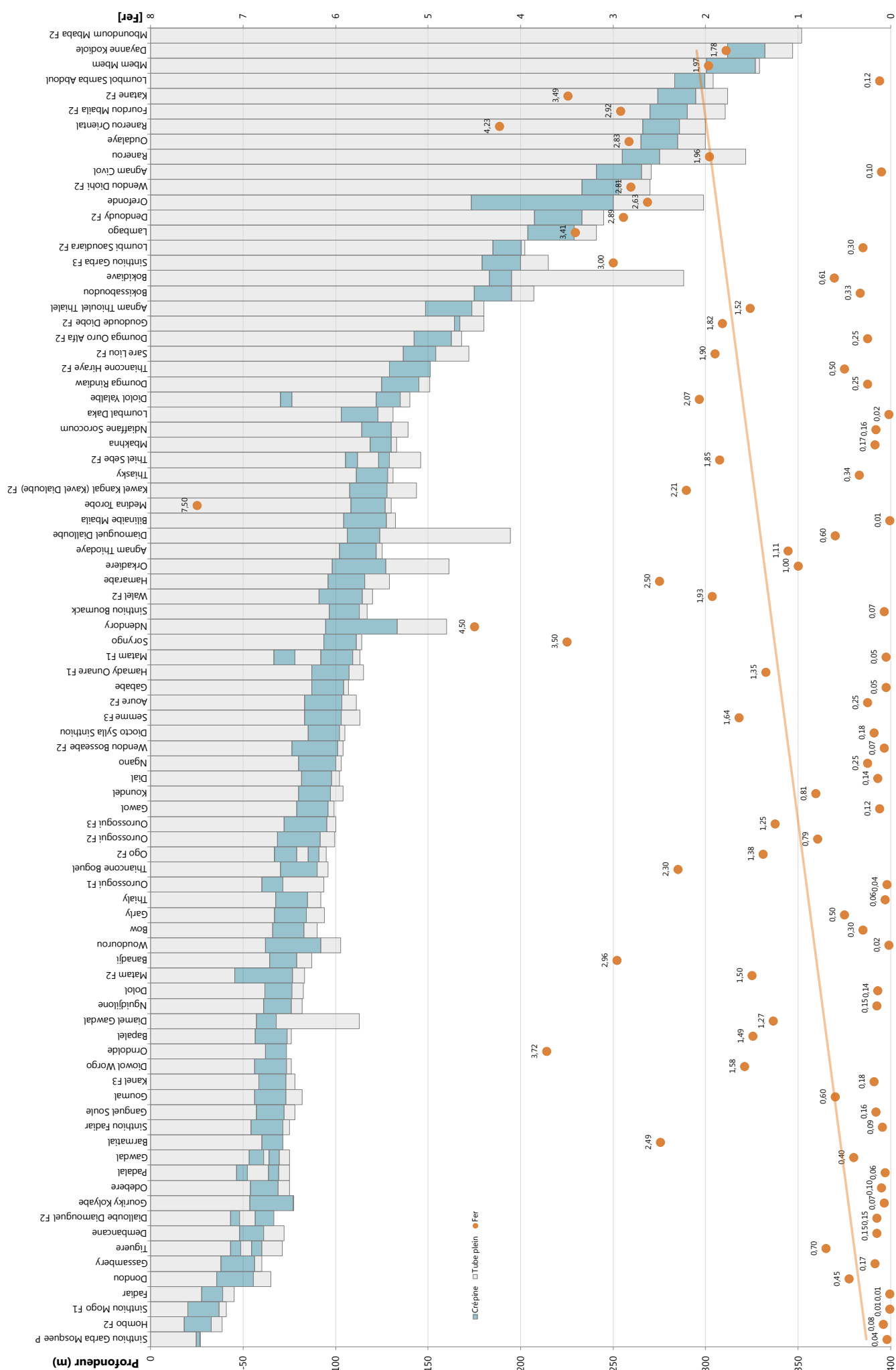
Forage	Profondeur totale (m)	Côte crépines (m/sol)	Débit ³² (m ³ /h)	[Fe] moyen (mg/l)	[Fe] max (mg/l)
Matam F1	113	-66 à -78 -92 à -110	62 - 39	0	0.05
Matam F2	83	-45 à -77	31 - 25	0.71	1.5

On constate que le F1 capte des niveaux un peu plus profonds que le F2, notamment un intervalle de 92 à 110 m non capté par le F2. Son débit est plus fort, et il n'a pas de fer. On pourrait en déduire que cet horizon plus profond, duquel provient l'essentiel du débit, est moins chargé en fer, alors que la

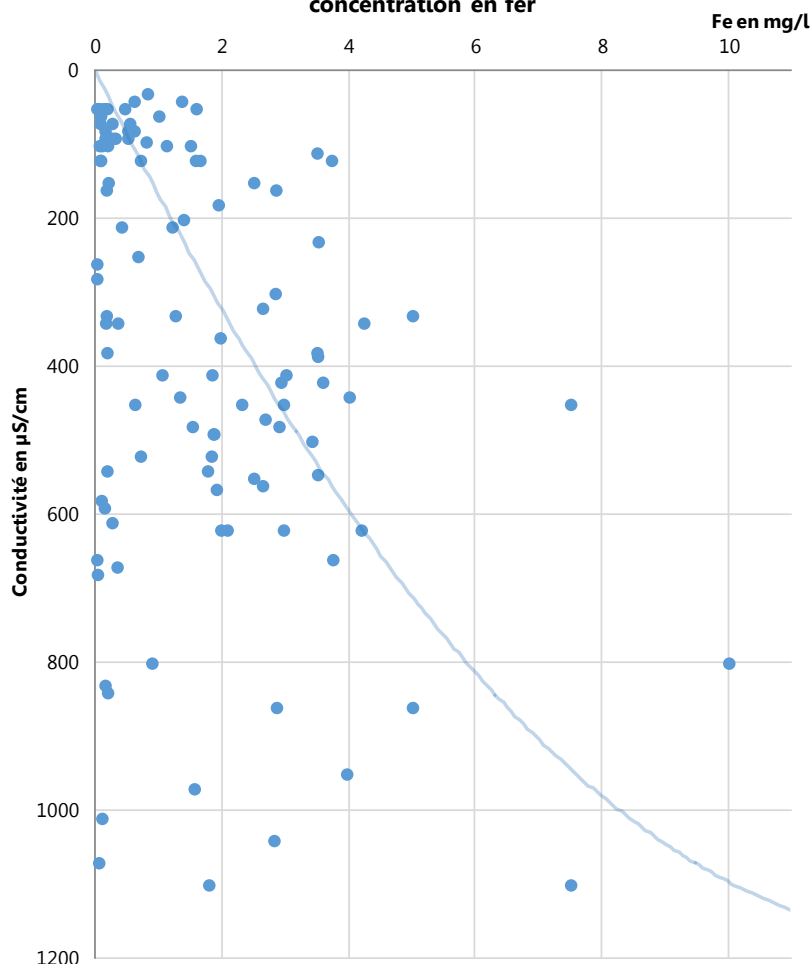
³² Première valeur : mesure de novembre 2012 – Deuxième valeur : mesure de mai 2013

couche l'horizon supérieure, notamment le niveau de 45 à 66m, apporterait le fer mesuré dans le F2. Il faut bien convenir que ces tentatives d'explication restent peu convaincantes dans le contexte, décrit par ailleurs, où les couches supérieures du Maastrichtien semblent en moyenne moins chargées en fer.

Concentration en fer dissous mesuré en sorti de forage, en fonction du niveau capté (86 forages pris en compte)



Corrélation entre la conductivité électrique et la concentration en fer



4.6.2.3.3. Relation entre fer et minéralisation

Une autre hypothèse serait que la concentration en fer puisse croître avec la minéralisation de l'eau, celle-ci pouvant elle-même croître avec le temps de contact eau-roche magasin, supposé augmenter avec la profondeur de l'aquifère.

Comme on peut le constater, la corrélation est très peu significative, si l'on excepte peut-être le groupe de points à très faible concentrations en fer qui correspondent à de faibles minéralisations : 31 sur 34 des forages à moins de 0.3 mg/l de fer ont des conductivités inférieures à 300 µS/cm. Ces forages sont pour l'essentiel localisés dans le Dandé Mayo.

4.6.2.3.4. Conditions de captage et d'exploitation

De la même façon, on a recherché si les variations de concentration pouvaient être imputés à d'autres paramètres, tels que :

- les conditions d'exploitation des ouvrages, en particulier l'existence de périodes d'arrêt prolongées sur certains ouvrages
- le diamètre et le type de crépines
- le débit d'exploitation, sachant que les fortes vitesses d'entrée de l'eau dans les crépines sont un élément favorable au développement des bactéries du fer
- l'âge des forages

Aucun de ces critères ne semble montrer de liaison significative avec la concentration en fer.

On conclura de l'analyse du jeu de données disponible que le meilleur critère susceptible d'expliquer la répartition des concentrations en fer semble être la localisation. Même si ce critère n'est pas absolu, il semble bien qu'il existe des zones à forte concentration et des zones à faible concentration, comme l'a montré la carte commentée ci-dessus.

4.6.2.4. Evolution des concentrations dans le temps

Compte tenu des difficultés décrites au chapitre 4.6.2.1 dans la quantification du fer, il n'existe pratiquement pas de possibilités de comparer des mesures anciennes et récentes effectuées dans les

mêmes conditions de prélèvement et d'analyse. Seule une étude ancienne³³ mentionne quelques résultats d'analyses de fer, qui sont tous élevés à très élevés.

Le rapport en question n'apporte aucun éclaircissement sur le type de prélèvement et d'analyse, ni commentaire sur ces concentrations élevées (il s'intéresse plutôt aux problèmes des chlorures et du fluor dans les régions situées plus à l'ouest). Cependant, on peut faire l'hypothèse que ces mesures étaient des dosages de laboratoire, effectués sur des échantillons stabilisés, comme il était d'usage à l'époque.

Mesures anciennes de conductivité et de fer (ante-1967)

Forage	Côte crépines (m/sol)	Résidu sec (mg/l)	[Fe] (mg/l)
Dendoudi F1	212-231	248	5.0
Liou	182-188	284	4.0
Loumbi Saoudiara F1	186-205	224	5.3
Loumbi Sud (SE Velingara)	443-464	376	4.8
Loumbol (Samba Abdul)	283-299	144	4.5
Ouro Mamoud (S de Loumbol)	-	216	11.0
Thilogne F1	-	296	2.3
Semme F1	113-135 (?)	88	4.0
Velingara F1	280-300	632	5.5

Malheureusement, aucun de ces forages, qui sont aujourd'hui abandonnés (hormis Loumbol Samba Abdul), n'a pu être remesuré lors de nos campagnes. Seuls les forages de Dendoudy permettent une comparaison dans le temps :

- Le forage Dendoudy F2, situé à quelques mètres de l'ancien forage Dendoudy F1 abandonné, a fourni en février 2014 une valeur de 2.9 mg/l, du même ordre que celle mesurée avant 1967.
- Le forage Dendoudy F3 (forage routier) lui aussi sur le même site a présenté une concentration comprise en 5 et 10 mg/l³⁴.

Hormis pour ce dernier forage, les valeurs anciennes sont systématiquement plus élevées que celles mesurées dans notre l'inventaire (exemple Loumbi Saoudiara 4.8 mg/l en 1967, contre 1.83 en 2013), ces différences pouvant provenir des méthodes d'analyse³⁵.

En tout état de cause, il semble évident que l'existence de fer dissous dans les eaux du Maastrichtien en région de Matam n'est pas un phénomène nouveau.

³³ Etude Géochimique des eaux souterraines de l'Afrique de l'Ouest, Nappe des « Sables Maastrichtiens du Sénégal », CIEH / BRGM (1967)

³⁴ Ordre de grandeur uniquement du fait de l'utilisation, en cas de concentration > 5mg/l, de bandelette QUANTOFIX® peu précises (cf. 4.6.2.1.)

³⁵ Les analyses anciennes pourraient concerner le fer total, incluant la fraction colloïdale non mesurée par l'appareil de terrain utilisé dans le cadre de cette étude

5. Conclusion et recommandations

5.1. Conclusions et recommandations sur l'inventaire lui-même

5.1.1. Périmètre de l'étude

L'inventaire de terrain a été mené de novembre 2012 à janvier 2015, soit un peu plus de 2 années. Les phases de terrain ont été séparées des phases de bureau au cours desquelles les missions ont été préparées, puis dépouillées et analysées en commun entre ADOS et la DRH.

Pour l'interprétation des mesures et leur confrontation, chaque fois que possible, à des mesures plus anciennes, cette période de deux années a été considérée comme un seul horizon de date, nommée « période actuelle ».

Au total, 234 captages ont été inventoriés, dont 158 sont exploités (dont 3 en secours), et 76 non exploités. L'inclusion dans l'inventaire des forages non exploités, et même de certains forages abandonnés (voire de forages disparus) n'est pas superflue. Elle permet d'éviter des confusions entre ouvrages ; leur visite peut aussi s'avérer intéressante en ce qu'elle peut apporter des informations de tous ordres (niveaux, historique des problèmes, possibilités de récupération, etc.)

La grande majorité des ouvrages visités est constituée de forages publics, mais l'inventaire inclut également 5 forages privés, ainsi que 3 puits (deux publics et un privé), utilisés pour l'alimentation en eau potable.

Les 150 forages exploités visités représentent environ 95 % des forages publics exploités en région de Matam. C'est dire que les informations collectées et les mesures effectuées présentent un caractère de représentativité bien suffisant au niveau de la région.

La méthodologie, avec en premier lieu la priorité accordée à la recherche d'une « réalité terrain » appuyée sur des mesures, ainsi que les enseignements à tirer des difficultés rencontrées seraient probablement extrapolables à d'autres régions du Sénégal.

5.1.2. Caractéristiques et état des équipements

5.1.2.1. Captages

Ce document apporte des informations fondamentales sur les différents types d'ouvrages, leur statut actuel, leur âge de création ou de réhabilitation, leur profondeur et les horizons captés, leur équipement tubulaire, et les possibilités qu'ils offrent de les mesurer et de prélever leurs eaux.

Le bilan des données disponible à la fin de ce travail d'inventaire met toutefois en évidence les graves déficits qui subsistent encore dans différents domaines, pourtant fondamentaux, comme la numérotation IRH, la coupe technique, les essais de pompage, l'existence de mesures de niveau récentes et la possibilité de procéder à des mesures nouvelles. En effet, en l'état actuel, seul un forage sur deux permet l'introduction d'une sonde de mesure de niveau³⁶.

³⁶ Voir la recommandation n°4, qui regroupe trois types de mesures fondamentales pour la gestion des captages

Recommandation 1 | Référentiel commun de numérotation des captages

Il semble vraiment fondamental que tous les captages, ou au moins les forages, soient dotés d'un numéro unique, dans un même système de référence. Ce système existe depuis longtemps au Sénégal, et a été appliqué historiquement à l'ensemble des forages anciens (numérotation IRH, pour Inventaire des Ressources Hydrauliques). Malheureusement, les moyens affectés à ce travail n'ont pas suivi la progression rapide du nombre de forages, et son caractère systématique s'est donc perdu. C'est ainsi que, malgré des demandes à la DGPRE et les efforts déployés par ce service, et malgré nos recherches dans les inventaires anciens pour retrouver, infirmer ou confirmer certains numéros, la moitié du parc ne dispose pas de numéros IRH.

L'attribution d'un simple nom toponymique à un ouvrage, pour pratique qu'elle soit, ne suffit pas en effet, et est souvent génératrice de confusion, d'une part parce que l'orthographe d'un même forage peut changer d'une référence à l'autre, d'autre part parce qu'il existe fréquemment plusieurs forages du même nom.

Pour ces raisons, nous préconisons :

- de compléter rapidement les n° IRH manquants, par exemple en partant de l'inventaire
- pour tout nouveau forage créé (y compris les ouvrages privés dont le recensement est tout aussi fondamental) de rendre systématique l'attribution d'un n° IRH dès la délivrance, obligatoire, du rapport de fin de travaux
- de conserver la mémoire des forages anciens, même disparus, avec leur n° d'origine
- de conserver, à côté du n°IRH, les noms usuels toponymiques avec une orthographe normalisée, en les complétant par un n° d'ordre chronologique (en partant de ceux attribués dans cet inventaire). Par exemple, on a distingué, à Kanel :
 - Le forage 08-6X-0001, Kanel F1
 - Le forage 08-6X-0017, Kanel F2
 - Le forage 08-6X-0030, Kanel F3
 - Le forage 08-6X-00XX, Kanel F4, n° IRH non encore attribué

Pour les puits, il ne semble pas y avoir de n° IRH attribués jusqu'à présent, et l'on dispose uniquement de noms (par exemple Agnam Lidoubé P1 et P2, Sinthiou Garba P1, P2, P3, ...)

Recommandation 2 | Rapports de fin de travaux

Il est surprenant que seulement 34 % des forages de la région de Matam disposent d'un rapport archivé, que la réception des ouvrages ait pu être validée alors que moins de la moitié d'entre eux disposent d'une coupe technique, et d'un essai de pompage.

Faut-il insister sur le fait que la réception de tout nouvel ouvrage devrait être conditionnée, indépendamment des constatations de la visite de réception, à la délivrance d'un rapport de forage répondant à un cahier des charges précis, incluant notamment coupe géologique, détails de l'équipement, résultats des essais de pompage, analyse d'eau, etc.

Ce rapport, dont plusieurs exemplaires sur papier devraient être disponibles à Dakar, et à la Division Régionale de l'Hydraulique, constitue la référence de départ à partir de laquelle ces données fondamentales seront intégrées dans les bases de données informatisées, et auxquelles il doit rester possible de se référer en cas de doute sur une information.

L'inventaire a été l'occasion de constater qu'un certain nombre de forages dits « abandonnés » étaient encore ouverts, ce qui présente l'avantage important de pouvoir y mesurer facilement des niveaux statiques.

Cette utilisation comme piézomètres occasionnels est particulièrement intéressante en ce qu'il s'agit d'ouvrages anciens, sur lesquels on possède souvent un historique sur plusieurs décennies. Par ailleurs, leur transformation en piézomètres pérennes du réseau DGPRES serait facile et peu coûteuse.

Quant à la possibilité de les équiper de petites pompes, elle serait à étudier au cas par cas, soit pour faire face à des situations de crise en cas de panne sur les ouvrages qui les ont remplacé, soit pour les affecter à un besoin marginal particulier (jardin irrigué, pépinière, petite industrie, etc.)

Dans tous les cas, une réfection des têtes de ces ouvrages abandonnés s'avère absolument nécessaire pour éviter les pollutions de nappe qui sont actuellement possibles, voire avérées dans certains cas. Nous insisterons sur le fait que le risque de déversement accidentel, ou même intentionnel, de produits dangereux dans ces captages doit être absolument supprimé.

La réaffectation de ces ouvrages abandonnés non fermés pourrait faire l'objet d'une mission particulière, dont l'objectif serait d'effectuer un diagnostic sur chacun d'entre eux, puis de réfléchir, en fonction de ce diagnostic et des besoins locaux, à leur vocation :

- fermeture définitive (avec cimentation, pour éviter la mise en communication de plusieurs nappes par percement des tubages)
- fermeture provisoire, en attente de réaffectation
- transformation en piézomètre
- rééquipement à petit débit, pour un usage déterminé (après essai de pompage)

5.1.2.2. Equipements d'exhaure

Dans ce domaine, le travail d'inventaire a pu s'appuyer sur un suivi très bien mené par la BPF, qui tient à jour un fichier des équipements en place dans tous les forages exploités, concernant les caractéristiques des pompes et des groupes électrogènes. Ce suivi présente l'état actuel du parc, la critique qu'on pourrait lui faire est que chaque nouvelle saisie vient écraser la donnée sur l'équipement précédent, sans conservation de l'historique de chaque site. A l'avenir, le fichier d'inventaire fourni à la BPF, qui se substitue et complète le fichier précédent, permettra de conserver la chronologie de remplacement de pompes et de groupes, et éventuellement de mieux déceler les cas de fréquence d'intervention anormales par exemple.

Le travail de terrain a en outre permis d'établir la cartographie des énergies utilisées pour l'ensemble du parc de forage. Entre la première et la dernière compagne de cet inventaire, force est de constater qu'un travail important a été mené par la DRH, avec le soutien du PEPAM, sur le raccordement au réseau SENELEC des forages situés à proximité immédiate d'une ligne électrique. Il reste toutefois des optimisations à faire dans ce domaine, mais qui sont actuellement souvent mises en veille jusqu'à l'application de la réforme de l'OFOR (prévue en 2016 en Zone Nord). Il y a en effet de bonnes raisons de penser que les futurs gérants des installations rurales seront mieux armés que les actuelles ASUFOR pour aller négocier auprès de la SENELEC les coûts des travaux de raccordement et les tarifs de l'abonnement et de l'électricité.

Seuls les deux tiers des forages en région de Matam sont équipés de compteurs en état de marche. Cet état de fait est particulièrement dommageable, aussi bien pour le suivi des forages par leurs ASUFOR et la DRH (détection de dysfonctionnements des pompes) que pour celui des volumes exploités par les organismes chargés de la gestion des ressources.

Recommandation 4 | Spécifications techniques d'équipement des ouvrages neufs

Un certain nombre de forages neufs ou récemment réhabilités ne disposent pas, de façon un peu surprenante, de trois organes pourtant essentiels pour leur suivi :

- Un compteur de tête (en sortie forage) ; en variante sur certains forages, des compteurs ont bien été posés mais sont tombés en panne très rapidement (pour certains, dès les essais de production), ou alors sont très mal installés, ce qui les rend inopérants.
- Un orifice de mesure des niveaux, facilement accessible et d'un diamètre suffisant pour le passage d'une sonde électrique
- Un robinet ou une vannette de prélèvement, permettant le prélèvement d'échantillons d'eau en amont de tout contact avec l'air (mesures du fer, du pH, du potentiel d'oxydoréduction).

La présence de ces trois organes doit être systématique. Rappelons :

- qu'un compteur de production en bon état de marche est absolument nécessaire à la connaissance du débit à la gestion des ouvrages
- que non seulement la mesure des niveaux statiques est nécessaire au suivi des nappes³⁷, mais que celle des niveaux dynamiques l'est également pour le suivi de l'ouvrage ; la comparaison périodique de mesures de débit/rabattement avec celles des essais de réception ou de réhabilitation des ouvrages, est le meilleur moyen de détecter les baisses de rendement des pompes ou des captages, et d'anticiper ainsi des pannes graves
- que beaucoup de diagnostics erronés sur la qualité des eaux proviennent uniquement de mauvaises conditions de prélèvement des échantillons

En conséquence, il semble absolument nécessaire qu'un CPS-type, exposant les spécifications détaillées de ces trois organes, avec des règles de montage respectant celles préconisées par les constructeurs (notamment en ce qui concerne la pose des compteurs), soit imposé aux entreprises pour tout nouveau forage ou réhabilitation. Une vérification de leur bon fonctionnement s'impose ensuite lors des visites de réception des ouvrages.

Enfin, parallèlement à cette introduction de règles systématiques pour les nouveaux captages, des interventions a posteriori sur les ouvrages incomplets sont absolument nécessaires.

L'objectif est clair : plus de pompage à l'aveugle. Tout forage doit pouvoir être mesuré facilement et de façon fiable sur ses trois caractéristiques principales: niveaux, débit et qualité.

5.1.2.3. Equipements de stockage et de distribution

En région de Matam, tous les systèmes AEP visités présentaient au moins un ouvrage de stockage fonctionnel, aucun refoulement direct en réseau n'a été observé. Le cas le plus fréquent est l'implantation d'un château d'eau de 15 à 20 m et d'une contenance de 50 à 200 m³. Dans les 2/3 des

³⁷ Un réseau piézométrique, si complet qu'il soit, ne suffit pas. Sans les mesures réalisées dans le cadre de l'inventaire sur des forages exploités, le tracé de cartes comme les cartes piézométriques et la carte d'évolution des niveaux n'eut pas été possible.

cas, ce réservoir n'alimente qu'un seul village. A la marge, on trouve encore une petite dizaine de localités où l'unique ouvrage de stockage est un réservoir au sol conçu uniquement pour l'abreuvement du bétail, configuration qui n'est pas adaptée à la consommation humaine dans des conditions sanitaires acceptable. Ces sites sont principalement situés dans le Ferlo, zone où les points d'eau sont déjà en sous-nombre.

Recommandation 5 | Sécuriser l'usage domestique sur les points d'eau pastoraux

Dans un souci d'amélioration des pratiques, de facilitation de l'accès à l'eau et de diminution des risques sanitaires et des maladies hydriques liées à de mauvaises conditions de stockage et de siphonage, il est recommandé d'adapter les quelques points d'eau concernés. Ces derniers comprennent souvent un forage alimentant un réservoir au sol desservant un ou plusieurs abreuvoirs à proximité. Aux abords immédiats du réservoir peuvent alors se côtoyer les populations remplissant des bidons et autres conteneurs et du bétail s'abreuvent dans le borbier provoqué par le siphonage. Dans ces localités, qui sont généralement de petits villages, des adaptations du système de distribution doivent être mise en œuvre :

- Création d'un réservoir surélevé (même de petite capacité et faible hauteur), connecté au réseau en amont du réservoir au sol attribué aux abreuvoirs, avec installation d'un système de vannage pour alimenter en priorité les populations, d'un compteur de distribution permettant de mesurer la répartition des volumes entre les deux usages.
- Création d'une borne fontaine alimentée par le nouveau réservoir surélevé, spécifiquement dévolue aux populations du village d'implantation du forage pour la sécurisation de leur approvisionnement
- Création éventuelle d'une potence pour le remplissage de conteneurs des populations des villages avoisinants

Concernant les ouvrages de distribution, on observe que les efforts conjoints de la DRH et du programme PEPAM-IDA ont permis un doublement du nombre de branchements privés sur la région ces dix dernières années. Ce type d'appuis aux ASUFOR gagnerait à être prolonger dans la mesure où il :

- permet un accès immédiat à un point d'eau de qualité au sein de la concession, facilitant d'autant la substitution de cette ressource à l'utilisation d'eau de surface ou de puits présent parfois au sein de la concession (sous réserve d'une sensibilisation efficace), et améliorant donc les conditions sanitaires.
- permet aux ASUFOR, notamment les plus petites qui ont parfois du mal à financer la densification des réseaux faute de recettes suffisantes, d'augmenter leurs ventes et d'atteindre potentiellement un volume critique qui leur permettra plus tard de provisionner et de financer elles même de nouveaux programmes de branchement privés, extensions, renouvellement d'équipements ou de réseau, etc.

5.1.3. Usages de l'eau, pratiques d'exploitation et de gestion

La majorité des forages (68 %) alimentent en même temps les populations et le bétail. Seuls 32 % ont l'usage domestique comme vocation unique. 32 % des ouvrages sont également utilisés pour l'irrigation, le plus souvent de façon marginale.

La connaissance des volumes exploités, de leur répartition selon les besoins, de leur évolution au cours de l'année et d'une année sur l'autre en fonction du déplacement du bétail, qui constitue une des tâches fondamentales des gestionnaires des captages (ASUFOR, Unité pastorale, comités de gestion, DRH-BPF) reste très fragmentaire. Seuls 35 % de ces gestionnaires tiennent correctement un cahier de forage et remplissent de façon routinière les fiches de consommation. Et encore plus de 3/4 ne transmettent-ils pas systématiquement ces fiches à la BPF. Or le suivi centralisé des consommations réelles, de leur répartition entre les différents usages et de leur évolution dans le temps s'avère absolument nécessaire, tout comme celui des événements qui jalonnent la vie du captage.

Recommandation 6 | Améliorer le suivi de l'exploitation par les ASUFOR et par la BPF

Le remplissage quotidien des fiches de consommation est une nécessité absolue, comme l'est leur transmission mensuelle à la BPF, et demain à l'OFOR, qui doivent avoir les moyens de les dépouiller et de les exploiter. Le suivi des volumes prélevés, ainsi que celui de leur répartition entre usages et de leur variation dans le temps sont des éléments déterminants :

- à l'échelle du captage, il permet d'analyser l'évolution de la consommation pour les différents usages ainsi que d'attirer l'attention sur des anomalies (baisse anormale du débit imputable au forage ou à la pompe en place, surproduction symptomatique de fuites, surévaluation des besoins ou surdimensionnement des équipements).
- à l'échelle de la commune et de la région, il permet de mettre en évidence l'amélioration de l'accès à l'eau ou au contraire la stagnation, voire le recul local, et d'en rechercher les causes ; il permet également la mise en évidence de tendances évolutives (déplacements du bétail), de déficits ou de surplus chroniques dans certains secteurs, à prendre en compte pour la planification des équipements. Il fournit enfin les données d'évolution de l'exploitation des ressources dans l'espace et dans le temps nécessaires à leur gestion.

Le remplissage du cahier de forage est tout aussi essentiel. Il doit consigner toutes les opérations non inscrites sur les fiches de consommation mais qui concernent la vie du captage : opérations de maintenance périodique (vidanges des groupes électrogènes, nettoyage des châteaux d'eau, nettoyage des compteurs), pannes ou problèmes détectés, interventions diverses sur les captages, les réservoirs et les réseaux. Il doit être également transmis à la BPF qui doit en tirer les éléments de la planification de la maintenance.

En région de Matam, la première phase du Programme Hydraulique (cf. 1.1.1) a permis la création et l'impression de cahiers de forages adaptés à chaque catégorie d'ouvrage (solaire, thermique, électrique) à destination des conducteurs de forages. La saisie des données d'exploitation s'y fait de manière quotidienne ; à la fin du mois, le conducteur dispose de 3 copies (une qu'il conserve sur le site, une destinée à l'ASUFOR et une à transmettre à la DRH souvent via une préfecture ou sous-préfecture). Cet outil a fait ses preuves mais son mode de diffusion (stock unique disponible au niveau de la fédération des ASUFOR à Ourossogui) gagnerait à être amélioré pour accélérer son déploiement.

5.2. Conclusions et recommandations sur la gestion des ressources en eau souterraines

5.2.1. Rappels sur les aquifères

Le chapitre 4.1 effectue une présentation rapide des aquifères de la région de Matam, basée sur la documentation existante : extension, nature, piézométrie et caractéristiques hydrogéologiques, qualité des eaux. Il est illustré notamment par une coupe hydrogéologique simplifiée NE-SO, qui montre de façon schématique le gisement des aquifères de la région de Matam.

En ce qui concerne le Maastrichtien, principal aquifère de la région comme du pays, la coupe indique comment la formation, imprégnée d'eau douce sur l'ensemble de sa hauteur dans toute la partie orientale de la région, voit sa base contaminée par un biseau d'eau salée à l'ouest du méridien de Vélingara.

5.2.2. Éléments nouveaux apportés par l'inventaire

Le premier élément nouveau concerne l'attribution stratigraphique des captages, qui est proposée généralement dans les rapports de forage, sur la base de critères divers. Dans la plupart des cas, cette attribution ne pose pas problème, et est donc reprise telle quelle dans l'inventaire. Cependant, dans quelques cas, l'amélioration des connaissances en matière de piézométrie (notamment le décalage entre les niveaux du Continental Terminal et ceux du Maastrichtien), ou bien en matière de qualité des eaux, permet de corriger avec une quasi-certitude ces attributions a priori.

Le chapitre 4.2 expose ensuite, aquifère par aquifère, un certain nombre d'éléments nouveaux extraits de l'inventaire concernant la profondeur des forages et celle des niveaux captés, les débits et débits spécifiques. La recommandation 9 plus loin évoque l'intérêt de la prise en compte par les études hydrogéologiques à venir de ces éléments nouveaux.

5.2.3. Prélèvements

5.2.3.1. Prélèvements actuels

La reconstitution des prélèvements actuels nécessite d'abord que les forages soient munis de compteurs fonctionnels, ensuite que ces compteurs soient correctement relevés par les gestionnaires et enfin que les relevés soient transmis à la BPF où ils doivent être exploités. Comme on l'a vu, le nombre d'ouvrages pour lesquels l'ensemble de cette procédure normale est opérationnelle reste faible (environ ¼).

Pour les autres forages, il a également été vu comment la production pouvait être reconstituée à partir du débit (mesuré ou théorique) et des durées journalières de fonctionnement plus ou moins connues (cf. 3.2.1).

Nous renverrons ici aux recommandations 4 et 6 : il est impératif que la production de chaque forage soit connue, avec son cycle de variations annuelles, ainsi d'ailleurs que le nombre d'heures de fonctionnement journalier. Ces données sont nécessaires pour juger de la bonne adéquation de la pompe en place aux besoins réels, et, le cas échéant, programmer son remplacement.

Cependant, il faut reconnaître que la comparaison de la production annuelle ainsi reconstituée, forage par forage, et des besoins résultant des populations, du cheptel, et éventuellement de l'irrigation déclarés par les ASUFOR gestionnaires de ces forages, ne permet pas de corréler les deux approches.

Les informations sur les populations desservies et la fréquentation du bétail sont beaucoup trop fragmentaires. En revanche, l'estimation des besoins au niveau communal a pu s'effectuer sur des bases plus solides (cf. 4.3.1.2) :

- Pour l'AEP, application de normes de besoins unitaires (incluant les pertes estimées des réseaux) aux données de population fournies par le recensement de 2013
- Pour le bétail, application de la norme unitaire de 40 l/j/UBT au nombre d'UBT calculé par commune à partir des statistiques de l'ANSD/SRSD Matam - 2013
- Pour l'irrigation, application d'une dose moyenne de 15 000 m³/ha/an au total des Ha irrigués déclarés sur la commune lors de l'inventaire

Les résultats obtenus sont globalement cohérents, à + 8 % près (14.8 Mm³/an contre 13.7 Mm³/an) avec ceux des productions annuelles (débit x durée journalière de pompage), ce qui permet, en l'attente d'approches plus précises, d'assimiler les productions aux besoins.

Ils permettent d'abord de constater que l'alimentation du bétail est l'usage dominant, avec 50 % des besoins, assez loin devant l'AEP (37 %). L'irrigation représenterait 13 % des besoins totaux.

Ces résultats globaux masquent de fortes évolutions dans l'espace : dans le Ferlo, les besoins du bétail dominent largement (80 à plus de 90 % des prélèvements), tandis que dans le Diéri et plus encore le Dandé Mayo c'est l'AEP qui domine largement (60 à 70 % du total dans les anciennes Communautés rurales, jusqu'à 87 % dans les communes urbaines) ; l'irrigation est marginale, sauf dans deux communes où existent de véritables périmètres irrigués par forage.

Rapportées aux superficies des communes, ces résultats permettent de calculer un indicateur intéressant, la « pression de prélèvement ». Cet indicateur a pour but d'évaluer comment les prélèvements actuels se répartissent sur la surface d'extension des ressources en eau, et de les comparer avec l'évolution des niveaux.

On peut ainsi constater que la pression des prélèvements est actuellement environ 10 fois plus forte dans le Dandé Mayo et le Diéri, zones où les ressources sont heureusement partiellement rechargées via le Fleuve, que dans le Ferlo, où elles sont fossiles. Ce résultat est une donnée importante à prendre en compte pour la gestion future des ressources souterraines (recommandation 13).

5.2.3.2. Evolution dans le temps des prélèvements

La reconstitution de l'historique des prélèvements dans les nappes est un des éléments fondamentaux de la gestion des eaux souterraines. Il s'agit en effet de mettre en perspective l'évolution de ces prélèvements et celle de leurs impacts sur les niveaux et sur la qualité des eaux extraites. De façon très schématique, on dira qu'un niveau de prélèvement qui n'engendre pas d'impacts mesurables sur une nappe pendant une période suffisamment longue (25 ans par exemple), est susceptible d'être maintenu, voire prudemment augmenté, pendant au moins une durée équivalente.

Mais, dans un contexte d'augmentation constante des prélèvements, il n'existe pas de niveau de prélèvement stable, dont les effets puissent être mesurés sur une période suffisamment longue. Ainsi, les prélèvements globaux dans les nappes de la région de Matam sont passés de 7.6 à 13.6 Mm³ (+80 %) sur les 25 dernières années, et de 5.4 à 13.6 Mm³ (+150 %) sur les 50 dernières années.

En conséquence, l'utilisation de modèles mathématiques calés sur des historiques de prélèvements et de niveaux (ainsi éventuellement que de salinité) est la seule méthode capable de permettre d'évaluer les effets à long terme de scénarii de développement des prélèvements, déduits de ceux des besoins en eau. Or, si la connaissance des prélèvements actuels est fragmentaire, et donc imprécise, la reconstitution des prélèvements passés l'est encore plus.

Le chapitre 4.3.2.1 décrit de façon détaillée le processus suivi pour cette reconstitution des prélèvements des forages, des puits et des communautés urbaines, ainsi que les approximations et hypothèses qui ont permis cette reconstitution (qui constitue à notre connaissance une des rares tentatives dans ce sens, non seulement en région de Matam, mais sur l'ensemble du domaine d'extension de la nappe maastrichtienne). Le chapitre 4.3.2.2 tente ensuite, de façon encore plus approximative, de reconstituer l'évolution des prélèvements par aquifères.

On notera en particulier qu'en 1960, les puisages dans le Continental Terminal dominaient, avec environ 3.15 Mm³/an puisés dans 350 puits, contre 2.17 Mm³/an pompés dans la dizaine de forages captant alors le Maastrichtien. En 2015, la proportion s'est largement inversée: les quelques 160 forages captant le Maastrichtien extraient environ 11.2 Mm³/an, alors que la quinzaine de forages et les centaines de puits exploitant (de façon très extensive pour les puits) le Continental Terminal n'extraient plus qu'environ 1.4 Mm³/an.

Recommandation 7 | Améliorer la connaissance des prélèvements dans les puits et préciser la vocation des "nappes phréatiques"

La nappe maastrichtienne, du fait de ses conditions de gisement (elle n'affleure jamais et est donc toujours recouverte d'une formation de couverture, même si celle-ci est peu épaisse et plus ou moins perméable), ne peut être captée que par des forages. Ceci implique - sauf exceptionnellement dans des ouvrages de type forages-puits - des pompages mécaniques, dont la production peut être facilement mesurée par des compteurs.

Toutes les autres nappes (nappes alluviales, CT, Eocène, nappes du socle) sont des nappes phréatiques (dites libres), même si elles peuvent parfois, comme le CT dans la zone du creux piézométrique, s'avérer profondes. Elles peuvent donc être captées, selon les besoins et les possibilités locales, alternativement par des forages ou des puits. Si l'ensemble des prélèvements par puits ne représente plus, selon nos estimations, que 6 % des prélèvements totaux en région de Matam, il n'en demeure pas moins que les puits restent, en cas de panne des forages, des ouvrages de secours vitaux. D'autre part, les nappes phréatiques sont, pour certaines d'entre elles (nappe alluviale du Fleuve, nappes perchées, nappe Eocène pro-parte, nappes du socle), rechargées et de bonne qualité (exemptes de fer, en particulier) ce qui en fait des ressources alternatives dont l'utilisation, en soutien, voire en remplacement des pompages dans le Maastrichtien dans certaines zones pourrait être développée.

Quant au Continental Terminal, principale nappe phréatique, bien que très peu ou pas rechargée, son importance est telle que le suivi de son exploitation et des effets de celle-ci doit être renforcé. Or, encore une fois, la connaissance des prélèvements actuels va de pair avec le suivi des niveaux et de la qualité de l'eau. Mais dans le contexte actuel, l'essentiel des efforts de la DRH-BPF concerne logiquement les forages et leur exploitation, au détriment des puits.

A notre avis, un recensement sommaire des puits, limité à une collecte d'informations orales sur leur nombre, leurs usages et leurs conditions d'exploitation, pourrait déjà être entrepris pour chaque Commune à partir des informations déjà rassemblées dans les PLHA. Le premier objectif serait de préciser les estimations de prélèvements fournies dans ce rapport, et d'obtenir une connaissance globale un peu plus précise des disponibilités pour des captages de secours. Parallèlement, il nous semble incontournable qu'une réflexion soit développée sur les vocations que l'on souhaite attribuer aux différents aquifères, avec pour objectif d'améliorer la programmation des captages nouveaux : quel(s) aquifère(s) disponible(s) pour tel type de besoin et tel secteur, à quelle(s) profondeur(s), avec quel type de captage le plus adapté, et avec quels résultats attendus (débit, HMT, qualité).

5.2.4. Piézométrie

L'apport de cet inventaire aux connaissances sur la piézométrie des nappes de la région de Matam est détaillé dans le chapitre 4.4, aquifère par aquifère.

En ce qui concerne le Continental Terminal, les mesures de niveau effectuées, complétées par quelques mesures anciennes relevées dans la documentation existante, ont permis le tracé d'une ébauche de carte piézométrique. Cette carte montre l'allure d'ensemble de l'écoulement de la nappe, marqué essentiellement par l'existence du « creux piézométrique » dans la zone centrale du Ferlo, où les cotes absolues de la nappe descendent sous -20 m et même -40m NGS.

Le faible nombre de couples de mesures du niveau statique « ancien-actuel » ne permet malheureusement pas de se faire une idée correcte de l'évolution des niveaux dans cette nappe. Les quelques indications semblant indiquer une montée des niveaux sont certainement à considérer avec précaution, dans une nappe sujette à de fortes variations de niveau annuelles (et qui devrait en toute logique, au mieux rester plus ou moins stable, au pire baisser plus ou moins nettement).

On en déduira, en matière de recommandations, qu'un effort particulier sur le réseau piézométrique et la recherche d'historiques est à apporter au niveau de cet aquifère (recommandation 9).

Les rares mesures de niveau effectuées dans l'Eocène n'apportent que quelques informations fragmentaires. L'essentiel des apports de l'inventaire concerne bien sûr l'aquifère Maastrichtien. Précisons tout d'abord que les mesures effectuées en état statique ne permettent pas de tracer de carte piézométrique, puisque, compte tenu du caractère très « plat » de la surface piézométrique, ceci nécessiterait un nivellement de précision des repères de mesure.

Pour tous les forages suffisamment anciens, un effort particulier a été apporté à la recherche des valeurs d'origine du niveau statique, afin de pouvoir apprécier l'évolution de ce niveau depuis la création de ces ouvrages. On a ainsi pu analyser 35 doublons de mesure « ancien-actuel », complétés par 15 doublons reconstitués en faisant appel à des forages voisins. La précision de ces reconstitutions ne dépasse pas ± 1 m, mais on peut la considérer comme nettement suffisante pour tracer une carte d'évolution des niveaux dans le Maastrichtien entre 1955 et la période actuelle. Cette carte met clairement en évidence les deux tendances fortes suivantes :

- Il existe, entre Fleuve et Diéri, une tendance nette à la montée des niveaux depuis les années 1980-2000; cette tendance se matérialise surtout en trois secteurs du Dandé Mayo, où cette montée dépasse nettement les +2 m, et parfois les +3 m.
- À l'ouest du Diéri, se dessine une tendance généralisée à la baisse des niveaux depuis les années 1950, d'abord modérée (-2 m en moyenne), mais se creusant rapidement vers l'ouest (-4 m à Ranérou), -6 à -8 m, parfois plus, autour de Vélingara, Mbem-Mbem, Kare Kabi.

La zone intermédiaire, plus ou moins alignée sur le Diéri, est marquée logiquement par une stabilité des niveaux.

Le premier phénomène, la montée des niveaux, n'a pas d'explication évidente, et celle que nous proposons, un contrecoup de la stabilisation du niveau du Fleuve depuis la mise en service du barrage de Manantali, mériterait d'être confirmée et précisée.

Le second phénomène, la baisse des niveaux, en a une certaine, qui est le contrecoup des prélèvements croissants qui s'effectuent dans l'aquifère. Cette baisse serait en effet générée à la fois par les prélèvements - encore limités - qui s'effectuent en région de Matam, et par l'extension vers l'est des effets des pompages qui s'effectuent sur l'ensemble du réservoir, notamment dans les secteurs intensément exploités de l'ouest.

Recommandation 8 | Tracé de cartes piézométriques

Dans ses rapports périodiques de suivi piézométrique, la Division Hydrogéologie de la DGPRE fournit des cartes du « niveau piézométrique » des différents aquifères. Il s'agit en réalité de cartes de « profondeur sous le sol du niveau piézométrique ». Rappelons qu'une véritable carte piézométrique, illustrant les directions d'écoulement, les gradients, etc. est une carte en courbes de niveau des altitudes absolues de la surface piézométrique d'une nappe (parfois appelées charges hydrauliques), et nécessite donc de connaître l'altitude des points de mesure.

Dans les nappes à fort gradient, des ébauches peuvent être obtenues à partir d'altitudes repérées sur des cartes, ou actuellement de relevés de GPS classiques ou d'utilisation des vues Google Earth. En revanche, pour toute véritable carte piézométrique, où une précision de l'ordre de ± 0.30 m est requise, un nivellement de précision à partir des bornes du réseau NGS (ou à la limite l'utilisation d'un GPS très performant) reste incontournable.

L'établissement d'une bonne carte piézométrique est en particulier nécessaire au calage des modèles mathématiques, mais sa répétition périodique présente nettement moins d'intérêt que le tracé de graphiques montrant l'évolution annuelle et interannuelle des niveaux.

Recommandation 9 | Révision du réseau piézométrique et des procédures de dépouillement des données, prise en compte des données anciennes

D'après les plus récents rapports de suivi qui nous aient été transmis par la DGPRE³⁸, le réseau piézométrique sur les régions de Saint-Louis, Louga et Matam³⁹ comporterait 63 ouvrages, théoriquement mesurés 2 fois par an. Sur ce nombre, une vingtaine est située en région de Matam, une dizaine dans les secteurs limitrophes des régions de Saint-Louis et de Louga. Cependant, pour des raisons non décrites dans les rapports⁴⁰, seule une moitié au maximum de ces ouvrages sont mesurés à chaque campagne, et généralement pas les mêmes, ce qui limite beaucoup la possibilité d'établir des historiques.

Un renforcement du réseau, pas forcément en nombre de piézomètres, mais au moins en spécialisation de ceux-ci dans cette fonction, paraît donc nécessaire. On rappellera à ce niveau notre recommandation 3 concernant les forages abandonnés, dont un certain nombre pourrait être facilement valorisé de la sorte⁴¹. Ceci d'autant plus que l'intérêt de pouvoir raccrocher des mesures actuelles à une ou deux mesures anciennes est évident. Comme mentionné au chapitre 5.2.4, il serait souhaitable que le réseau soit particulièrement étoffé de deux ou trois bons piézomètres (qui pourraient être des puits spécialisés à cet effet) dans le CT de la zone centrale, où comme on l'a vu l'évolution des niveaux est particulièrement mal cernée.

Au niveau de l'interprétation des données, la lisibilité des rapports serait grandement améliorée par l'insertion systématique de tableaux et de graphiques récapitulatifs de l'ensemble des mesures effectuées (depuis l'origine des mesures, y compris celles recopiées sur les rapports de forage et de réhabilitation). Ces mesures seraient classées par aquifère, n°IRH, type de piézomètre, profondeur, coordonnées GPS et nom usuel complet des ouvrages, de façon à éviter des erreurs d'attribution.

³⁸ Février 2013

³⁹ Réseau issu de l'étude hydrogéologique du PSE, renforcé par la récupération du réseau OMVS

⁴⁰ On peut imaginer que, dans un certain nombre de cas, les niveaux soient influencés par des pompes, soit dans les ouvrages eux-mêmes, soit dans des ouvrages voisins. Auxquels cas, la mesure de niveaux pseudo-statiques, après une remontée suffisante, serait meilleure que pas de mesure du tout.

⁴¹ L'ancien forage Sinthiou Garba Falbe F2, 08-6X-0029, transformé en piézomètre après un essai de réhabilitation infructueux, n'est pas inclus dans le réseau alors qu'il est parfaitement mesurable.

5.2.5. Qualité des eaux

Les mesures de terrain effectuées dans l'inventaire ne concernent que la température, le pH, la conductivité, et le fer, dont l'analyse fait l'objet du chapitre 4.6.

5.2.5.1. Continental Terminal

Les valeurs de conductivité obtenues ont fait l'objet d'une cartographie. Très faibles dans l'ensemble, c'est-à-dire représentatives d'une très faible minéralisation, elles ne permettent pas de déceler une évolution dans l'espace. En effet, la seule valeur élevée (Kanel F1) pourrait relever d'une erreur d'attribution, le forage captant alors plutôt l'Eocène.

Les valeurs disponibles ne permettent pas de déceler d'évolution dans le temps

5.2.5.2. Eocène

Les valeurs de conductivité disponibles indiquent des minéralisations faibles dans certains secteurs, généralement proches du fleuve et donc susceptibles d'être rechargés, élevées dans d'autres (1300 $\mu\text{S/cm}$ à Sinthiou Garba), où elles laissent supposer une absence de recharge.

5.2.5.3. Maastrichtien

La cartographie de la conductivité de la nappe sur la base des mesures effectuées permet d'intéressantes constatations, avec d'est en ouest :

- une zone très peu minéralisée ($C \leq 100 \mu\text{S/cm}$) axée sur le Dandé Mayo, correspondant vraisemblablement à l'influence de la recharge contemporaine
- une augmentation très rapide vers l'intérieur ($400 \leq C \leq 1000 \mu\text{S/cm}$) dans la zone du Diéri et le début du Ferlo
- suivie d'une baisse dans le Ferlo central ($C < 500 \mu\text{S/cm}$), puis d'une nouvelle augmentation ($C > 700$ et $> 1000 \mu\text{S/cm}$) en bordure de la limite de la région de Louga

Ces évolutions traduisent d'une part l'influence, apparemment limitée, de la zone de recharge, d'autre part celle d'autres facteurs probablement liés à la lithologie. Quant à la rapide augmentation de la salinité qui se manifeste au niveau du méridien de Vélingara, elle constitue certainement un paramètre à surveiller de près.

En ce qui concerne l'évolution dans le temps, aucune tendance nette n'est mise en évidence, probablement du fait des nombreuses sources d'imprécision qui entourent les reconstitutions (influence des corrections de température, des formules de transposition des résidus secs en conductivités,...)

Recommandation 10 | Nécessité d'un suivi qualitatif renforcé et d'une recherche sur la situation du front eau douce-eau salée en profondeur

Les rapports de suivi de la DGPRE sont plus fournis en matière de conductivité que de niveaux statiques. Cependant, la dizaine de points figurée sur les cartes du CT et la quinzaine figurée sur les cartes du Maastrichtien semblent insuffisants pour bien décrire l'évolution de ce paramètre à l'échelle de la région. Un renforcement par d'autres points semble nécessaire, notamment dans la zone d'augmentation de la salinité du Maastrichtien en bordure de la région de Louga. Il s'agit en effet de savoir si cette augmentation est intrinsèque, et liée à des facteurs lithologiques, ou bien s'il s'agit d'une influence des régions situées plus à l'Ouest, et plus ou moins liée à la baisse des pressions décrite plus haut.

Au niveau des cartes d'autre part, le tracé automatique de plages correspondant à des classes de valeurs est trop imprécis. Le tracé, même manuel, de courbes d'iso-valeurs avec mention des valeurs mesurées à chaque point leur serait largement préférable.

L'objectif serait d'obtenir, comme pour la piézométrie (recommandation 8), des cartes plus explicites, couvrant l'ensemble des trois régions, ainsi que des jeux de graphiques chronologiques montrant la totalité des points de mesure depuis leur origine.

Enfin, au-delà de la connaissance des horizons captés, il semble qu'une recherche doive être entreprise sur l'ensemble du réservoir, afin d'explorer les tendances à l'augmentation de la salinité avec la profondeur qui semblent se dessiner (cf. 4.5.3.2.), et de vérifier si le biseau d'eau salée qui imprègne la base de la formation (cf. coupe hydrogéologique simplifiée du chapitre 4.4.1) n'a pas avancé depuis les années 1950. Une telle recherche nécessiterait certes des moyens plus lourds (2 ou 3 forages d'étude profonds dans lesquels seraient réalisés des diagraphies et des prélèvements, et éventuellement leur équipement en ouvrages de surveillance), mais l'enjeu est d'importance : assurer la permanence dans le temps de la bonne qualité des eaux en région de Matam.

5.2.6.Fer

Le fer a une origine naturelle dans les eaux souterraines, et sa présence dans les eaux piégées dans les matériaux sablo-gréseux continentaux constitutifs des niveaux aquifères du Maastrichtien et du Continental Terminal est logique. Sans danger pour la consommation humaine ou animale, sa présence en excès est cependant génératrice de problèmes aigus pour les équipements hydrauliques et les réseaux d'adduction.

Dès les missions préliminaires, ADOS et la DRH ont inscrit la problématique du fer dans les objectifs de cet inventaire des captages et des ressources. Des problèmes aigus étaient effectivement visibles sur le terrain et confirmés par la DRH, quand bien même les analyses disponibles ne révélaient que des concentrations faibles à nulles.

Pour cette raison, ADOS a décidé de se doter d'un matériel d'analyse rustique, mais permettant une détermination efficace du fer sur le terrain. Les seules contraintes ont alors résulté des possibilités de prélèvement des échantillons.

En effet, le dépouillement des premières campagnes a montré clairement que les échantillons prélevés en sortie de réservoir, voire dans ceux-ci, étaient affectés d'une baisse variable, mais systématique, de la concentration en fer, consécutive à l'aération de l'eau et à la précipitation du fer qui en résulte. D'où la nécessité de prendre en compte le point de prélèvement des échantillons.

De même, des variations notables de concentration ont été mises en évidence lors du cycle de pompage. Ces variations dans l'espace et le temps ouvrent bien entendu des perspectives de solutions, au moins partielles, au problème.

Un classement et une carte des 102 points mesurés en sortie de forage (limités aux aquifères CT et Maastrichtien) ont pu être effectués. La cartographie met en évidence les tendances suivantes :

- Dans le Dandé Mayo, les concentrations en fer sont faibles (< 1 mg/l, et souvent < 0.3 mg/l) ; cinq forages font exception, avec des concentrations entre 1 et 4 mg/l, dont 3 sont situés dans le secteur de Ornoledé-Bapalel, dans le prolongement de la zone de forte concentration décrite ci-dessous.
- Le Diéri regroupe les plus fortes concentrations, avec dans l'ensemble d'assez fortes valeurs (1 à 2 mg/l), contrastant ponctuellement avec quelques forages peu chargés (≤ 0.5 mg/l). Les maximas sont atteints dans une zone centrée sur Ouro Sidy – Medina Torobe – Tekinguel, se prolongeant comme on l'a vu vers le Fleuve, où les concentrations dépassent 5 mg/l et atteignent localement jusqu'à 10 ou 20 mg/l
- En allant vers le Ferlo, on observe une décroissance progressive des concentrations, mais celles-ci restent globalement > 2 mg/l, et de l'ordre de 3 – 4 mg/l dans les secteurs de Ranérou Oriental et Mboundoum Mbaba ; en revanche, des concentrations voisines de 1 mg/l sont mesurées en bordure de la région de Louga.

Il n'a toujours pas été possible d'apporter des explications convaincantes à la variabilité extrême des concentrations d'un forage à l'autre dans certains secteurs, ni par la stratification ou la minéralisation des eaux, ni par les conditions d'exploitation des captages. Reste la cartographie qui, malgré sa complexité, apporte malgré tout une première vision de la distribution dans l'espace du problème, et permet de définir un secteur d'intervention prioritaire.

Recommandation 11 | Amélioration de la connaissance de la problématique du fer

L'augmentation des connaissances relatives à cette problématique devrait selon nous prendre en compte :

- La représentativité des mesures : compte tenu de la fiabilité discutable des analyses de laboratoire sur des échantillons non stabilisés, la procédure de réception des forages nouveaux doit exclure tout ouvrage sur lequel l'analyse de fer n'a pas été effectuée suivant les règles de stabilisation de l'échantillon fournies par le laboratoire, ou avec un appareil de terrain suffisamment précis.
Quant à la pose d'un piquage permettant le prélèvement des échantillons en sortie de pompe, elle doit être systématique (cf. recommandation 4).
- Les cartes montrant la répartition du fer dans l'espace ne doivent être tracées que sur la base d'échantillons prélevés en sortie de pompe, avant aération et transit dans un réservoir.

Devant l'intérêt manifesté par un certain nombre de partenaires (OFOR, PEPAM, DGPRE) lors de restitutions partielles des résultats acquis, ADOS a proposé de lancer une mission d'approfondissement de la problématique fer, pour laquelle elle sollicite la collaboration et l'aide de ces organismes. Cette mission comporterait 4 volets :

- Une poursuite des mesures, axée sur la cartographie et l'analyse fine des variations de concentration durant les cycles de pompage, permettant de nourrir les réflexions sur les possibilités de modification des réservoirs et de la gestion des réseaux ;
- Une étude technico-économique sur le coût des nuisances liées au fer ;

- Des recherches bibliographiques sur les systèmes de déferrisation, allant de la simple aération à des systèmes plus performants comme l'oxydation biologique ;
- Une réflexion sur les enjeux au niveau régional : définition de sites prioritaires, volumes à traiter, localisation de sites pilotes pour des traitements sommaires à sophistiqués.

Recommandation 12 | Mise en œuvre de mesures simples de limitation des impacts du fer sur les équipements

Dans l'attente des mesures plus radicales qui ne pourront être mises en œuvre qu'après amélioration des connaissances et mise en œuvre d'un programme, quelques mesures propres à améliorer la situation sur les forages les plus atteints pourraient déjà être appliquées :

- Opérations de régénération des crépines de forage (traitement chlore + brossage crépines ou jetting + airlift)
- By-passing des premières minutes de pompage dont les eaux sont souvent les plus chargées en fer
- Optimisation simples des réservoirs et de leur exploitation pour augmenter et mieux gérer la sédimentation :
 - Adaptation du refoulement pour favoriser l'aération
 - Relèvement de la vidange des réservoirs, aménageant ainsi une réserve en fond de cuve destinée à favoriser la sédimentation et le stockage avant évacuation périodique des boues, limitant ainsi le relargage en réseau
 - Augmentation de la fréquence de nettoyage des réservoirs et de leur efficacité par traitement au chlore + brossage
- Remplacement des compteurs à cadrant "noyés" par des compteurs à cadrant "secs" dont la lecture n'est pas affectée par des dépôts de fer, et qui ne nécessite pas de nettoyage fréquent.

5.2.7. Elargissement de l'inventaire et insertion dans un outil de gestion des données

L'introduction des résultats de cet inventaire dans un outil de suivi performant, adapté aux besoins de ses utilisateurs, la DRH en premier lieu, et accessible à tous les acteurs de l'eau aux niveaux régionaux et nationaux, figurait dans les objectifs initiaux du Programmes Hydrauliques. Cependant, l'évidence s'est imposée au fil des mois que cet objectif ne pourrait être tenu compte tenu d'un certain nombre de difficultés :

- Préexistence d'un certain nombre de bases de données parallèles, assez segmentées et spécifiques aux différents services du Ministère de l'Hydraulique et plus ou moins adaptées à leurs besoins propres, mais sans vocation de partage de données ; ces bases, notamment la base PROGRES de la DGPRE, sont partiellement utilisées mais généralement peu renseignées. Lors du lancement des travaux d'inventaire à Matam, le cahier des charges pour la modernisation de PROGRES était en phase de finalisation et les besoins identifiés à Matam n'ont pas pu y être pleinement intégrés.

- Existence de projets parallèles de « suivi-évaluation »⁴², dont celui d'une base "unifiée" (ou d'un système unifié de bases de données) présentant des objectifs voisins de celle recommandée par ADOS, mais qui n'aura finalement pas vu le jour
- Absence apparente d'une stratégie concertée pour rattraper le retard sur la saisie des données et faire vivre les outils existants, exploités pour cette raison en deçà de leurs capacités (et devenant souvent obsolètes avant d'avoir été réellement utilisés),

Pour ces raisons, il a été décidé de se limiter à la récolte et à la production de données et à leur bancarisation, avec l'aide de la DRH de Matam, dans un simple outil tableur, disponible à la DRH et accessible aux services intéressés. Ce jeu de données, couplé à un SIG pour l'édition de cartographie thématique, est considéré comme provisoire mais il intègre déjà une masse assez considérable d'information, qui est disponible pour une insertion dans un outil plus performant qui reste nécessaire. En effet, si le tableur permet une bancarisation simple et des traitements de données élémentaires (statistiques, graphiques), il ne permet pas un partage et un travail collaboratif étendu, ni une gestion encadrée des accès par type d'utilisateur notamment

Recommandation 13 | Outil de capitalisation et de gestion des données

ADOS a exposé à plusieurs occasions ses conceptions quant à un outil « idéal ». Celui-ci devrait d'abord, à l'image de cet état des lieux, comporter deux volets :

- Un volet « équipements et gestion », rassemblant l'ensemble des informations disponibles⁴³ sur les captages, les équipements d'exhaure, les équipements de stockage et de distribution, la gestion de ces équipements par les ASUFOR. Ce volet, alimenté au travers d'un « inventaire permanent », permettrait une veille technique des ouvrages (caractéristiques techniques, suivi des pannes, planification des interventions et des pièces de rechange, réflexions sur l'adéquation et l'évolution des équipements) ; il servirait également d'interface entre les ASUFOR et leur tutelle
- Un volet « suivi des ressources », regroupant toutes les informations de suivi des volumes exploités, des niveaux, et de qualité des eaux et les traduisant sous forme de documents de synthèse simples (graphiques, cartes). Ce volet aurait à la fois une vocation de mutualisation des données, à la disposition de l'ensemble des acteurs du développement intervenant dans la zone (y compris les Collectivités et leurs ASUFOR), et une vocation d'aide à la décision, mettant à la disposition des responsables de la planification du développement les connaissances actualisées leur permettant de planifier ce développement dans une optique de préservation des ressources

Pour cela, cet outil devrait posséder les fonctionnalités d'un SIG et celles d'un tableau de bord, permettant l'édition facile de tableaux, graphiques et cartes thématiques, pouvant caractériser aussi bien la situation actuelle d'un paramètre (par exemple les pompes solaires, les forages non mesurables, les ASUFOR possédant des équipements de secours, ou celles comptabilisant correctement leur production, etc.) que son évolution dans le temps. L'intérêt du développement d'un outil aussi ambitieux dépasserait largement la seule échelle régionale, mais la région de Matam pourrait, partant de cet inventaire, servir de test.

Cependant, un tel projet resterait une fois de plus voué à l'échec si les moyens humains, organisationnels et informatiques n'étaient pas déployés pour permettre :

⁴² Le document préparé par l'Unité de coordination du PEPAM pour l'Atelier de travail du 26 nov 2013 sur le renforcement du système de suivi-évaluation sectoriel fait un point complet sur ces projets

⁴³ C'est-à-dire aussi bien les données caractérisant l'état actuel de ces équipements que celles de leur historique, regroupant donc des fonctionnalités des bases REGEFOR (DEM), PROGRES et CHRONO (DGPRE).

- L'association étroite, dès sa conception, de ses futurs utilisateurs (hydrogéologues, hydrauliciens et électromécaniciens, mais aussi responsables des projets de développement),
- L'affectation et la disponibilité de personnel compétent chargé de son alimentation par des données actualisées et vérifiées, et de son fonctionnement dans la durée,
- Et enfin sa réelle prise en main par l'ensemble des acteurs concernés.

ADOS renouvelle ici sa proposition, déjà exprimée à plusieurs reprises, de participer à la préparation du cahier des charges d'un tel outil.

5.2.8. Nécessité de la révision d'un dogme

Au Sénégal, un des problèmes majeurs de l'hydrogéologie est l'insuffisance des moyens qui lui sont alloués, qui se traduit notamment par un manque de mesures récentes et vérifiées conduit alors au recyclage de données anciennes, souvent non vérifiées, dans les études successives qu'elles soient universitaires ou produites par l'Administration.

Le présent inventaire comporte un certain nombre de mesures de terrain, de vérifications, de statistiques, qui constituent un bagage de données récentes, centrées sur la région de Matam, mais ayant pour certaines une portée plus générale. L'exploitation de ces données en termes de connaissance des prélèvements, de leurs impacts sur l'évolution des niveaux, de cartographie des conductivités et des teneurs en fer, a été faite dans le but de contribuer à la gestion des eaux souterraines et de permettre des choix d'options pertinents. Un certain nombre de constats originaux ont été ainsi rendus possibles, dont le principal est sans doute la mise en évidence d'une baisse, encore modérée mais nette, des niveaux dans le Maastrichtien du Ferlo. Cette baisse des niveaux, attribuée pour partie aux prélèvements locaux, pour partie à l'influence de la baisse plus notable qui s'effectue plus à l'ouest, se superpose à une augmentation de la minéralisation des eaux vers l'ouest.

Ces constats viennent en partie contredire une opinion semble-il couramment admise, selon laquelle les ressources de la nappe Maastrichtienne seraient tellement colossales (on parle de 300 à 500 milliards de m³) qu'elles seraient quasiment inépuisables, surtout en région de Matam où elles seraient largement rechargées. Cette opinion se nourrit, selon nous, d'une confusion entre l'évaluation des volumes d'eau stockés dans les couches aquifères, effectivement considérables, et celle de la fraction qui peut en être extraite sans générer d'impacts trop lourds en termes de niveau et de dégradation de la qualité.

Quant à la recharge actuelle, qui semble assurée sous le Fleuve, au moins ponctuellement, elle semble avoir effectivement d'intéressants effets à proximité de celui-ci.. Mais son rayon d'influence n'est pas connu, et ne saurait en tout état de cause concerner que le Diéri et, au maximum, la bordure orientale du Ferlo.

D'une façon plus technique, cette opinion rassurante se fonde sur les résultats de modèles mathématiques, qui constituent effectivement les seuls outils aptes à évaluer correctement les volumes exploitables. Mais la représentativité de ces modèles semble être affectée par l'absence d'un calage en régime transitoire pour certains, par l'utilisation pour ces calages d'historiques piézométriques non représentatifs de l'évolution réelle des niveaux, parce que trop courts⁴⁴, pour d'autres. Ceci rejoint la nécessité d'intégrer dans les suivis piézométriques les relevés anciens, déjà évoquée plus haut (recommandation 9).

⁴⁴ Après un premier calage en régime permanent sur un état piézométrique originel, un deuxième calage en régime transitoire a pour objet d'introduire l'historique des prélèvements connus et d'ajuster les paramètres de façon à ce que le modèle restitue correctement l'historique des niveaux connu. Le modèle « calé » est alors apte à simuler les effets des scénarii de prélèvements nouveaux, parmi lesquels on choisira ceux qui garantissent à la ressource une durée de vie suffisante.

5.2.9. Conclusion sur les apports espérés de cet inventaire

Le premier objectif assigné à l'action n°5 de la deuxième phase du Programme Hydraulique Régional (2013-2015) était de réaliser un inventaire permettant de disposer de tous les indicateurs sur l'état du Parc de captages et des équipements hydrauliques en région de Matam : caractéristiques techniques (dimensions, débits, profondeur, matériel d'exhaure et de distribution...), état de la gestion locale. Cet inventaire a été mené dans deux dimensions complémentaires : une plongée dans les données déjà capitalisées dans diverses sources, bases de données et inventaires précédents, et des campagnes de terrain permettant de vérifier, actualiser et compléter ces données, notamment par la réalisation systématique d'un certain nombre de mesures simples.

Le travail réalisé, malgré ses imperfections et son manque d'exhaustivité permet :

- d'accéder rapidement à l'essentiel des caractéristiques, sur les tous captages, nécessaires à une bonne gestion, par interrogation de sa base de données
- de présenter l'état des connaissances qui sont aujourd'hui disponibles sur chaque ouvrage, et donc de mettre en évidence certains manques en données qui nécessiteraient une attention particulière voire de nouvelles investigations.
- une vision synthétique de l'état réel du parc grâce aux traitements statistiques qui en ont été tirés, de ses insuffisances, de ses problèmes et de ses atouts, ainsi que de l'état actuel de sa gestion.

Dans l'attente de la concrétisation d'un outil dont les principes sont résumés dans la recommandation 13 ci-dessus, la « veille technique » qui y est évoquée n'est pas encore opérationnelle. Mais les données nécessaires à l'alimentation de cet outil sont rassemblées.

Le deuxième objectif de ce volet du Programme était d'améliorer la connaissance des ressources en eau souterraines (état quantitatif et qualitatif) afin de favoriser la sensibilisation des acteurs, et d'éclairer et faciliter ainsi la prise de décision à tous les niveaux, du local au national. Cet inventaire a été en effet l'occasion de collecter un grand nombre d'informations nouvelles sur l'état des nappes et de les confronter aux informations antérieures (dont la disponibilité n'est pas toujours évidente), puis d'en effectuer une synthèse. La recommandation qui suit expose la conception qu'a ADOS de la prise en main de cette synthèse par les acteurs de l'eau.

Recommandation 14 | Diffusion, partage et exploitation des principaux résultats de ce travail

Ce travail a l'ambition, non seulement d'apporter une photographie instantanée de l'état d'un parc d'équipement hydraulique régional, mais de permettre un regard neuf sur les ressources en eau souterraine de cette région, ressources plus ou moins partagées avec les régions voisines.

Cette ambition ne se concrétisera que dans la mesure où le rapport sera diffusé, discuté et exploité, et où ses recommandations seront effectivement mises en œuvre :

- Au niveau local, il semble clair qu'un renforcement de la liaison ASUFOR-DRH est nécessaire pour que les ASUFOR prennent mieux en main leurs outils, et que parallèlement la DRH puisse assurer non seulement l'organisation de la maintenance mais aussi le contrôle de la production.
- Au niveau régional, la programmation des nouveaux captages et de leurs équipements (ARD, DRH, Collectivités) ne peut se faire sans une réflexion approfondie sur l'adéquation des

besoins aux ressources, aux plans quantitatif et qualitatif : quelle ressource pour quel besoin, et avec quels équipements ?

- Au niveau national enfin, ADOS souhaite que le « regard neuf » mentionné plus haut soit partagé et trouve un écho. En particulier, que les conclusions tirées de l'analyse des conséquences de l'exploitation passée et actuelle sur les niveaux, et peut-être sur la qualité des eaux, soient suffisamment diffusées pour corriger, sans catastrophisme mais avec réalisme, certaines idées reçues.

Le point de vue d'ADOS est que ce travail ne trouvera sa pleine utilité que s'il est prolongé à la fois dans l'espace et dans la durée.

- Dans l'espace, un certain nombre de recommandations sur les équipements, les méthodes de mesure et l'interprétation de celles-ci (par exemple en ce qui concerne le réseau piézométrique et les mesures qui y sont faites) ont un caractère général, et pourraient donc être étudiées au niveau national.

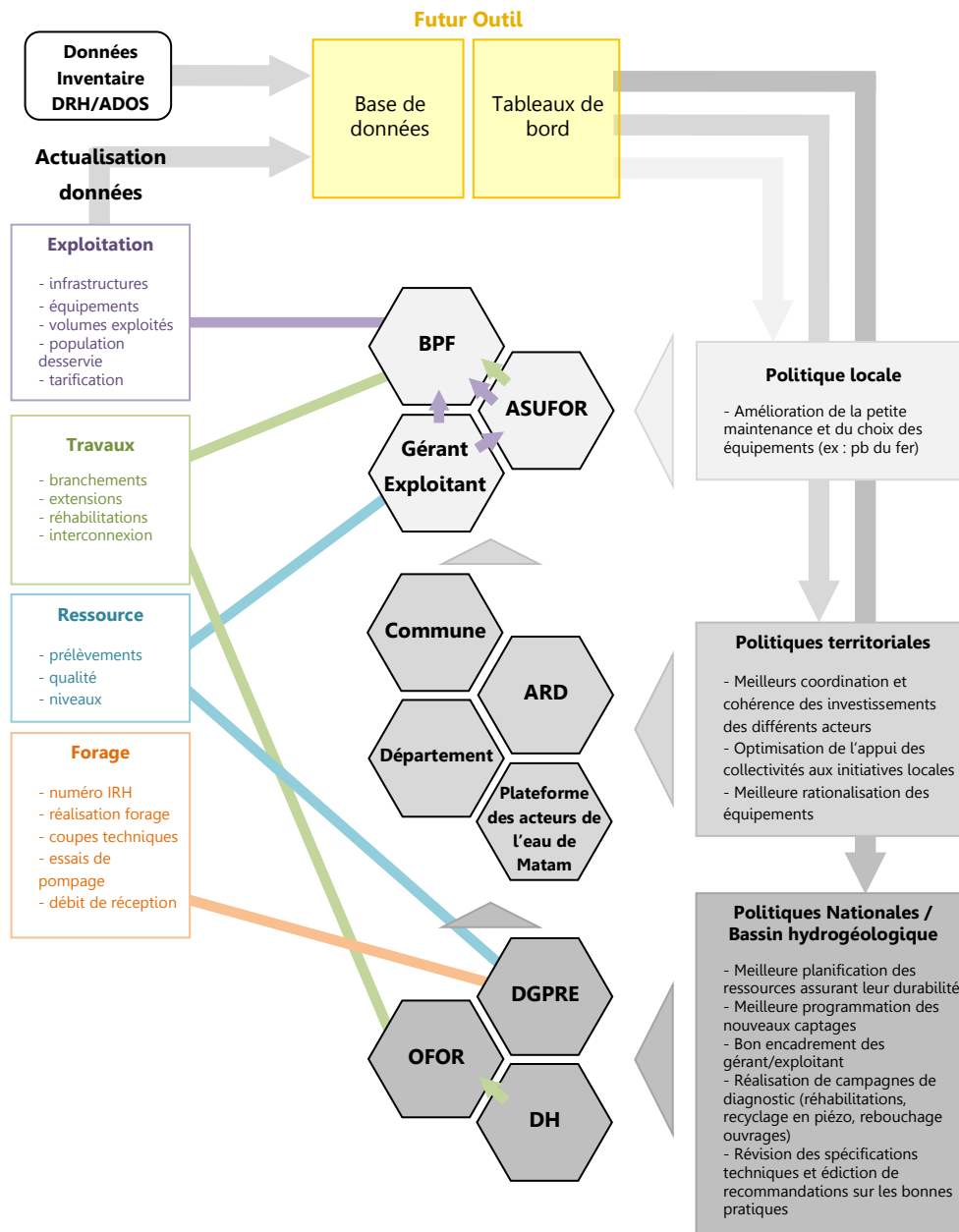
Quant aux analyses menées sur la piézométrie (qualité des eaux, volumes exploités, recharge, etc.), la nécessité de mise en œuvre d'une modélisation calée sur l'observation des phénomènes réels et des recommandations qui en découlent dépasse largement les limites de la région de Matam. Elle concerne en effet l'ensemble du domaine d'extension des réservoirs :

- Maastrichtien : au moins 6 régions situées au nord de la Gambie (Dakar excepté)
- Continental Terminal : au moins 3 à 4 régions.

Le suivi des ressources de ces réservoirs vitaux pour le pays et la programmation de leur exploitation durable ne peuvent donc s'effectuer que dans une logique de « bassins hydrogéologiques », analogue à celle qui prévaut pour les eaux superficielles.

- Dans la durée, l'objectif initial de suivi et d'aide à la décision ne peut être atteint qu'au travers de la mise en place d'un système permanent de collecte, actualisation exploitation et valorisation des données. Ce système alimenterait en permanence la partie « base de données » de l'outil souhaité, au profit de sa partie « tableau de bord » d'aide à la décision.

Le schéma conceptuel ci-après propose, à titre de document de réflexion, ce que pourrait être l'architecture d'un tel système. Les flèches bleues symbolisent la circulation des informations et des décisions dans une phase intermédiaire, les flèches jaunes leur circulation une fois l'outil mis en place.



Avec ou sans cet outil, la démarche « d'inventaire permanent » pourrait se mettre en place logiquement sur la région de Matam dans la foulée de cet inventaire, puis être rapidement étendue aux deux régions limitrophes de Saint-Louis et de Louga. Il est clair en effet que plusieurs problématiques abordées dans ce rapport (évolution des niveaux et des salinités sous l'effet de l'exploitation, problème du fer) non seulement leur sont communes, mais également ne peuvent être abordées valablement sans s'appuyer sur des mesures effectuées à l'échelle transrégionale.

ADOS est également prêt, si l'Administration le souhaite et si les moyens lui en sont donnés, à s'investir dans cette démarche de pérennisation et de démultiplication de l'inventaire des équipements et des ressources hydrauliques.



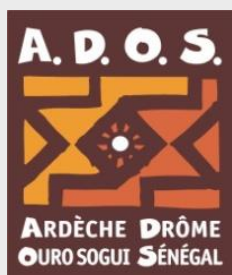
**Division
Régionale de
l'Hydraulique
de Matam**

Division Régionale de l'Hydraulique de Matam

Quartier Gourel Serigne - Matam, Sénégal

Tel : +221 33 966 61 58

Mail : aboufall2004@yahoo.fr



ADOS

Girodet – Bat A
Allée du Concept
26 500 Bourg les Valence, France

Tel : +33 475 55 99 90

Mail : courrier@ados-senegal.org

Quartier Gourel Serigne
BP 57

Matam

Tel : +221 33 966 64 72

Mail : ados@orange.sn