



Hôpital Régional de Matam (HRM)

ETUDE EXPERIMENTALE QUALITE BACTERIOLOGIQUE DES EAUX DE CONSOMMATION EN REGION DE MATAM

RAPPORT FINAL, MARS 2019



SOMMAIRE

I.	Contexte et objectifs	5
I.A.	Inventaire des captages d'eau potable en région de Matam	5
I.A.1.	Introduction.....	5
I.A.2.	Résultats principaux	5
I.A.2.a.	Nombre de captages et localisation	5
I.A.2.b.	Éléments d'hydrogéologie	6
I.A.2.c.	Typologie des captages.....	7
I.A.2.d.	Typologie des équipements.....	8
I.A.2.e.	Part de l'AEP dans les volumes prélevés.....	8
I.A.3.	Qualité physico-chimique des eaux distribuées.....	8
I.A.3.a.	Conductivité, résidu sec, faciès chimiques.....	8
I.A.3.b.	Fluor	9
I.A.3.c.	Fer.....	9
I.B.	Objectifs	9
I.B.1.	Qualité bactériologique, un manque crucial de données	9
I.B.2.	Présentation des objectifs	10
II.	Méthodologie.....	12
II.A.	Présupposés	12
II.B.	Nécessité d'un échantillon témoin de sites	12
II.C.	Choix des sites	13
II.C.1.	Critères de sélection	13
II.C.2.	Campagne préliminaire	14
II.C.3.	Liste définitive et typologie des sites retenus.....	17
II.D.	Travaux préliminaires aux campagnes de mesure.....	20
II.E.	Echantillons d'eaux de puits et d'eaux superficielles.....	20
II.F.	Modes de prélèvements.....	20
II.G.	Analyses.....	21
II.G.1.	Choix du laboratoire	21
II.G.2.	Paramètres analysés.....	22
II.G.2.a.	Bactéries coliformes totales	22
II.G.2.b.	Escherichia coli	22
II.G.2.c.	Entérocoques intestinaux	22
II.G.3.	Méthodes d'analyses.....	23
II.H.	Campagnes de prélèvements	24
III.	Résultats.....	25
III.A.	Qualité bactériologique en fonction de l'origine des eaux	25
III.B.	Contamination des eaux brutes de forage	25
III.C.	Evolution de la qualité des eaux de forage après stockage et distribution.....	26
III.D.	Caractère aléatoire ou systématique des contaminations	27
III.D.1.	En sortie de forage (eaux brutes)	27
III.D.2.	En sortie de réservoir	28
III.D.3.	Dans les réseaux	29
IV.	Recherche des paramètres explicatifs des contaminations.....	31
IV.A.	Effet de saisonnalité	31
IV.B.	Conditions météorologiques lors des prélèvements	31
IV.C.	Qualité des eaux souterraines	31
IV.C.1.	Température.....	31
IV.C.2.	Salinité	35
IV.C.3.	Concentration en fer	35
IV.D.	Paramètres liés aux forages eux-mêmes	37
IV.D.1.	Localisation des forages.....	37
IV.D.2.	Age des forages	37

IV.D.3.	Aquifères et profondeur des horizons captés	40
IV.D.4.	Caractéristiques techniques (diamètre, nature des tubages, des crépines...)	41
IV.E.	Paramètres liés à l'environnement proche des forages	41
IV.E.1.	Propreté et environnement des installations	41
IV.E.2.	Fréquentation des troupeaux	42
IV.E.3.	Cas particulier des puits équipés	42
IV.F.	Paramètres liés au pompage et au refoulement	43
IV.F.1.	Pompe et énergie	43
IV.F.2.	Colonnes de refoulement	44
IV.F.3.	Clapets anti-retour	44
IV.G.	Paramètres liés au séjour dans les réservoirs	45
IV.H.	Paramètres liés au transit dans les réseaux	47
IV.I.	L'exemple des forages du PHAR	48
IV.J.	Synthèse des facteurs de contamination	50
V.	Exploitation des résultats	51
V.A.	Extrapolation à l'ensemble du parc des forages à vocation de production d'eau potable de la région de Matam	51
V.A.1.	Représentativité	51
V.A.2.	Typologie des contaminations (« portrait-robot » des sites les plus vulnérables)	51
V.B.	Réflexion sur les solutions à mettre en œuvre	53
V.B.1.	Réflexion préliminaire	53
V.B.2.	Solutions préventives	54
V.B.2.a.	Sur les forages	54
V.B.2.b.	Sur les équipements de pompage	54
V.B.2.c.	Sur les châteaux d'eau	55
V.B.2.d.	Sur l'entretien des châteaux d'eau	55
V.B.2.e.	Sur les réservoirs au sol	55
V.B.2.f.	Sur l'éventualité, sur les sites à forte vocation pastorale, de spécialisation des captages	56
V.B.2.g.	Sur les réseaux	56
V.B.3.	Solutions curatives	56
V.B.3.a.	Sur les forages	56
V.B.3.b.	Sur les châteaux d'eau	56
V.B.3.c.	Dans les réseaux	57
V.B.3.d.	Aux points de consommation	57
V.B.4.	Définition des priorités	57
VI.	Conclusions et recommandations	59
VI.A.	Conclusions	59
VI.B.	Recommandations	60

LISTE DES CARTES

Carte 1 : Localisation des sites sélectionnés pour l'étude bactériologique	19
Carte 3 : Notes moyennes annuelles des contaminations des eaux brutes de forage	38
Carte 4 : Notes moyennes annuelles des contaminations des eaux des réservoirs	39

LISTE DES FIGURES

Figure I.A.1 : Coupe hydrogéologique schématique du Sud-Ouest au Nord-Est au travers de la région de Matam	7
Figure II.C.1 : Résultats de la campagne préliminaire classés par types d'échantillons	16
Figure III.A.1 : Pourcentage de contamination des eaux selon leur origine	25
Figure III.B.1 : Niveaux de contamination des eaux brutes des forages par campagne	26
Figure III.C.1 : Evolution des pourcentages de contamination au cours du trajet de l'eau	26
Figure III.D.1 : Caractère aléatoire ou systématique dans les eaux brutes	27
Figure III.D.2 : Caractère aléatoire ou systématique des contaminations en sortie de réservoir	28
Figure III.D.3 : Propagation des contaminations dans les (ou à partir des) réservoirs	29
Figure III.D.4 : Propagation des contaminations dans les réseaux	30
Figure IV.C.1 : Relation entre la température de l'eau en sortie forage et la profondeur moyenne des crépines	32
Figure IV.C.2 : Evolution de la température moyenne des eaux lors de leur trajet (production/stockage/distribution)	33
Figure IV.C.3 : Relation entre les notes de contamination et la température des eaux (tous échantillons)	33
Figure IV.C.4 : Relation entre les notes de contamination des eaux brutes et la température	34
Figure IV.C.5 : Relation entre les notes de contamination des eaux en sortie de réservoir et la température	34
Figure IV.C.6 : Relation entre les notes de contamination des eaux prélevées sur le réseau de distribution et la température	35
Figure IV.C.7 : Relation entre la concentration en fer et la note de contamination des eaux brutes	36
Figure IV.D.1 : Relation entre l'âge des forages et la note de contamination des eaux brutes	37
Figure IV.D.2 : Relation entre la profondeur des crépines et la note de contamination des eaux brutes	40
Figure IV.E.1 : Notes moyennes de contamination en fonction de l'utilisation des eaux	42
Figure IV.F.1 : Notes moyennes de contamination des eaux brutes et des eaux en sortie de réservoir selon le type de pompe	43
Figure IV.F.2 : Note moyenne de contamination des eaux brutes en fonction de l'état du clapet anti-retour	45
Figure IV.G.1 : Note moyenne de contamination en fonction du nombre d'heures de pompage moyen annuel	46
Figure IV.G.2 : Note moyenne de contamination en fonction du temps de séjour moyen annuel ...	46
Figure IV.G.3 : Note moyenne de contamination en fonction du temps de séjour pendant l'hivernage	47

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.C.1 : Critères de sélection des sites retenus	14
Tableau II.C.2 : Résultats de la campagne préliminaire	15
Tableau II.C.3 : Liste définitive et typologie des sites retenus	17
Tableau II.H.1 : Récapitulatif des campagnes réalisées	24
Tableau IV.C.1 : Répartition des mesures de fer effectuées au cours de l'étude	36
Tableau IV.I.1 : Résultats des forages du PHAR	49
Tableau IV.J.1 : Synthèse des facteurs de contamination	50
Tableau V.A.1 : Classement des forages inventoriés selon la durée moyenne des pompages (gauche) et les temps de séjour moyens (droite)	52

I. CONTEXTE ET OBJECTIFS

I.A. INVENTAIRE DES CAPTAGES D'EAU POTABLE EN REGION DE MATAM

I.A.1. Introduction

Le programme de coopération décentralisée mené par les Départements français de l'Ardèche et de la Drôme, et la Région Rhône-Alpes avec la région de Matam (ADOS opérateur, 1^{ère} phase 2010-2012, deuxième phase 2013-2015) a comporté un important volet d'accompagnement de la Direction Régionale de l'Hydraulique de Matam. Ce volet s'est matérialisé par la réalisation d'un inventaire des forages motorisés de la région de Matam, mené conjointement par la Division Régionale de l'Hydraulique et ADOS.

Cet inventaire, qui s'est déroulé de début-2012 à mi-2015, répondait à deux objectifs :

- améliorer et actualiser les informations disponibles sur le parc de captages et ses équipements hydrauliques à l'échelle régionale,
- faire progresser les connaissances sur les ressources en eau souterraine (seules les eaux souterraines font en effet l'objet de captages publics en région de Matam pour l'alimentation en eau potable et celle des troupeaux).

I.A.2. Résultats principaux

L'inventaire s'est achevé par la tenue de réunions de restitution rassemblant l'ensemble des partenaires concernés à Matam (Décembre 2015), Dakar (Février 2016), et Valence (Mars 2016), ainsi que par la publication d'un rapport de synthèse : « *Etat des Lieux du Parc de forages motorisés et des Ressources en Eau Souterraine de la région de Matam* », DRH-Matam / ADOS, Décembre 2015 ».

L'ensemble des données collectées a été introduit dans une « base de données » (sous forme d'un tableur Excel). Après une phase de compléments qui a été menée en 2017, le nombre de captages inventoriés a été porté à 269, avec un potentiel de variables à renseigner de 249, soit un nombre de cellules disponibles de 67 000. Avec le taux actuel de remplissage, encore malheureusement très incomplet, ce sont quand même plus de 20 000 données qui ont été introduites et ainsi rendues accessibles aux utilisateurs.

Nous nous limiterons ici à résumer les résultats qui sont en prise directe avec la présente étude sur la qualité bactériologique des eaux.

I.A.2.a. Nombre de captages et localisation

L'inventaire a surtout porté sur les 185 captages, pour l'essentiel publics, équipés de pompes mécaniques, et exploités au moins partiellement pour l'alimentation en eau potable.

Ces captages (182 forages, 3 puits équipés dédiés à la production d'eau potable), sont répartis au sein de la région de la façon suivante :

- 26% sont alignés sur le bourrelet de berge qui longe le Fleuve Sénégal (Dande Mayo),
- 8% sont situés dans la vallée inondable du Fleuve (Walo),
- 45% sont situés sur le rebord de la zone inondable (Diéri), siège de l'essentiel de la population du département (grâce à la présence de la route nationale),
- 21 % sont répartis dans la grande zone sylvo-pastorale du Ferlo qui constitue l'arrière- pays de la région de Matam.

On constate donc une importante concentration des forages dans la bande alignée en rive gauche du Fleuve Sénégal, sur une largeur variant de 15 à 25 Km, où 85% des ouvrages (et donc plus ou moins des prélèvements dans les nappes) sont concentrés sur une superficie qui ne représente que 15% du total de la région (29 600 Km²). Cette concentration contraste avec la faible densité des captages dans les 85% restants du territoire.

I.A.2.b. Éléments d'hydrogéologie

Les forages captent 4 aquifères principaux (voir figure I.A.1 ci-après):

- La nappe alluviale du Fleuve, qui s'étend sous l'ensemble du Dande Mayo et du Diéri (0 à 15m de profondeur) ; elle est essentiellement captée par des puits facilement creusés dans les alluvions argilo-sableuses ;
- La nappe superficielle de l'Eocène, située sous le Diéri ; également essentiellement captée par des puits un peu plus profonds (15 à 35m), elle alimentait les populations du Diéri avant la généralisation des forages ;
- La nappe du Continental Terminal (CT) se développe à l'Ouest du Diéri et couvre tout le Ferlo (en s'étendant vers les régions limitrophes de Saint Louis et de Louga). Exploitée par de nombreux puits, parfois très profonds (90m), elle a subvenu aux besoins des troupeaux (et des populations d'éleveurs) jusqu'aux années 1970 qui ont vu la création de la première génération de grands forages pastoraux. Elle fournit actuellement environ 10% du total prélevé, au travers d'une centaine de puits et de plus de quinze forages, captant les sables du CT entre 65 et 150m de profondeur ;
- La nappe du Maastrichtien qui lui succède en profondeur ne peut être captée que par forage. Présente sur les 2/3 du territoire national, elle constitue de loin le principal aquifère du pays. Artésienne, largement exploitée partout où elle n'est pas salée, elle est surexploitée dans les régions occidentales du pays. En région de Matam, elle constitue la ressource souterraine principale, captée entre -50 et -400 m de profondeur par au moins 165 forages sur les 212 qui possèdent une attribution stratigraphique¹.

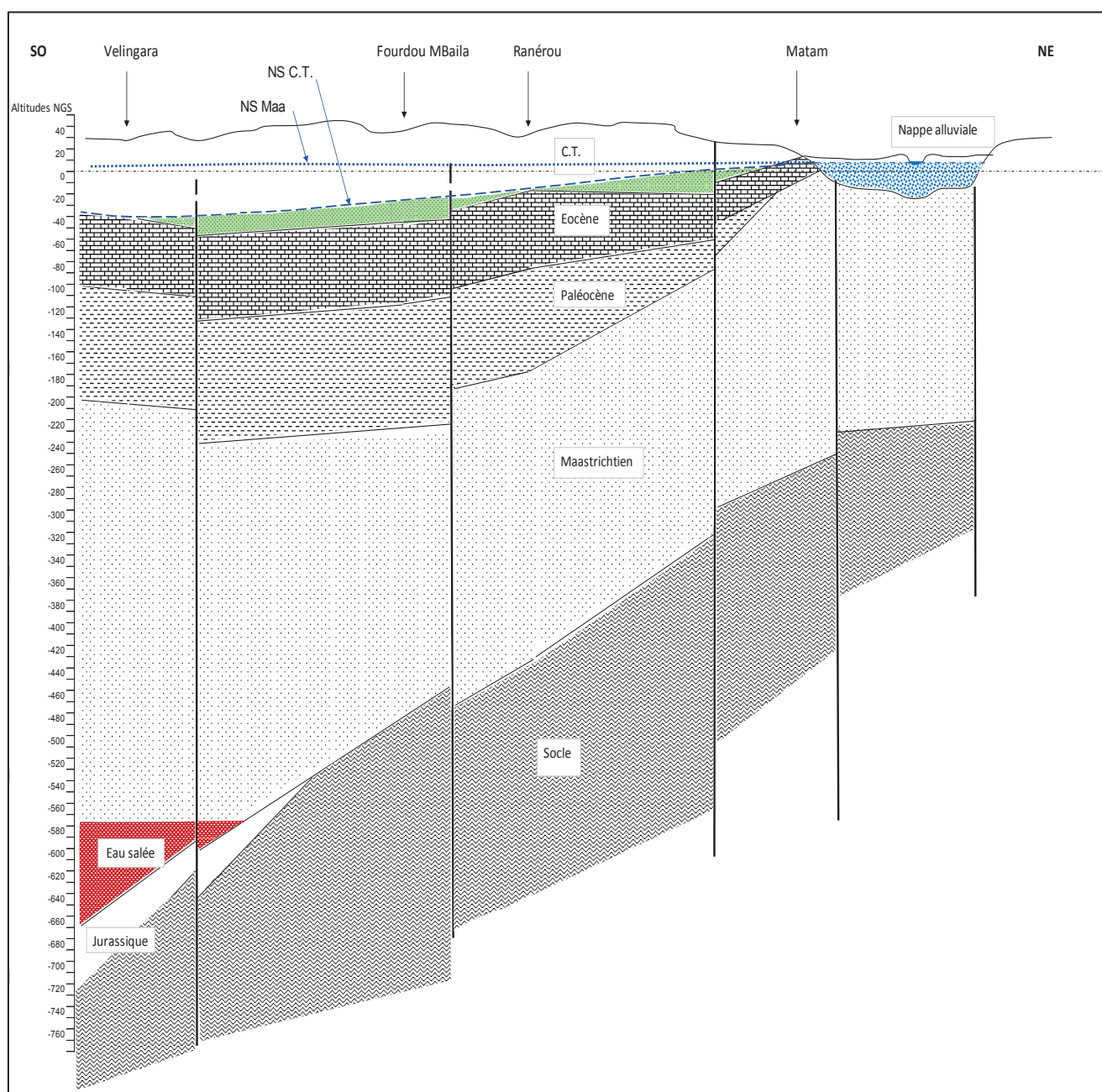
En ce qui concerne les possibilités de recharge actuelle de ces aquifères, la synthèse des données disponibles en matière d'hydro-climatologie, de signature isotopique des eaux et mesures piézométriques montre de façon claire :

- que la recharge n'est plus possible que dans la vallée du Fleuve, où le Fleuve lui-même (à niveau plus ou moins constant depuis 1989, date de mise en service du barrage régulateur de Manantali) établit une relation permanente avec sa nappe alluviale, et où les débordements de la crue résiduelle permettent également des bouffées de recharge annuelle. Cette recharge concerne évidemment en premier lieu la nappe alluviale, mais à travers elle, les nappes sous-jacentes (CT et Maastrichtien) peuvent en bénéficier.
- que dans le Diéri, une recharge effective des aquifères superficiels (Eocène et CT) par les précipitations est devenue impossible, du fait de la raréfaction de celles-ci, sauf peut-être exceptionnellement et localement à partir des crues des petits oueds affluents de rive gauche du Fleuve ;
- que dans le Ferlo la faiblesse des précipitations ne permet plus aucune recharge du CT ; quant au Maastrichtien, il est isolé de la surface par l'intercalation de couches imperméables.

La seule véritable recharge s'effectue donc à partir du Fleuve, et la question est de savoir jusqu'où elle sera susceptible de se propager vers l'intérieur pour compenser l'augmentation constante des prélèvements.

¹Quand ils existent, les rapports d'exécution des forages mentionnent généralement un « âge stratigraphique », c'est-à-dire une attribution de l'horizon capté à un aquifère donné (Eocène, ou Maastrichtien par exemple) ; ces âges ont parfois été corrigés par nos soins dans la BDD, mais un nombre notable de captages restent sans attribution certaine, quand leur profondeur et la qualité physico-chimique de leur eau n'apportent pas d'indices suffisamment clairs.

Figure I.A.1 : Coupe hydrogéologique schématique du Sud-Ouest au Nord-Est au travers de la région de Matam



I.A.2.c. Typologie des captages

La grande majorité des forages sont du type « télescopé », dans lequel la chambre de pompage en acier, de diamètre et de profondeur suffisants pour permettre l'installation et le bon fonctionnement des pompes, est prolongée en profondeur par un tube d'extension de diamètre intermédiaire en acier, puis par des crépines (souvent en acier inox) en un ou plusieurs éléments.

La génération des forages récents, peu profonds, réalisés dans le Dande Mayo, est d'un autre type puisqu'ils sont tubés, puis crépinés, en PVC (généralement en diamètre 200mm). Parmi les 54 forages de ce type, 33 sont des forages solaires (ce type d'équipement n'étant pas susceptible de fournir de gros débits).

Il reste par ailleurs 3 forages mixtes (forages-puits ou puits forages), derniers représentants d'une génération autrefois assez fournie.

I.A.2.d. Typologie des équipements

Les différentes catégories de pompes se répartissent ainsi :

- Pompes électriques immergées (alimentées par branchement au réseau): 58, soit 32%
- Pompes électriques immergées (alimentées par groupe électrogène): 51, soit 28%
- Pompes électriques immergées solaires : 32, soit 18% des forages équipés.
- Pompes thermiques (à axe vertical) : 9, soit 5% des forages équipés (en recul)

La montée en puissance progressive de la vocation « eau potable » par rapport à la vocation « pastorale » originelle s'accompagne logiquement d'une diminution des réservoirs au sol (qui ne concernent plus que 23 sites (17%), au profit des châteaux d'eau, qui équipent maintenant 135 sites (73%).

I.A.2.e. Part de l'AEP dans les volumes prélevés

Mis à part les captages solaires qui ne produisent que de l'eau potable, et certains captages réservés à l'irrigation, l'ensemble des autres captages publics partagent leur vocation pastorale avec une vocation de production d'eau potable (en hausse), et parfois une alimentation de jardins irrigués (marginale, mais en augmentation).

Les renseignements collectés auprès des gestionnaires des ouvrages permettent difficilement de distinguer les parts affectées à chacun des deux besoins principaux (eau potable et alimentation du bétail).

Une exploitation des données du répertoire des forages d'eau de 1984 (DEH) a permis d'évaluer que sur 62 forages répertoriés produisant 5,82 Mm³/an la part de l'eau potable s'élevait à 1,42 Mm³/an (24%). Pour les 12,9 Mm³ produits annuellement par les 174 forages exploités en 2015, on peut estimer que la part d'eau potable doit atteindre 35 à 40%.

Dans le détail, on peut avancer une part de l'eau potable de l'ordre de :

- 95% de l'eau extraite dans les forages solaires
- 85% de l'eau extraite dans les autres forages du Dande Mayo et du Walo
- 40 à 80% de l'eau extraite dans les forages du Diéri
- 10 à 30% de l'eau extraite dans les forages du Ferlo

I.A.3. Qualité physico-chimique des eaux distribuées

I.A.3.a. Conductivité, résidu sec, faciès chimiques

La quasi-totalité des eaux souterraines de la région de Matam bénéficie d'une qualité correcte à excellente, notamment sur le plan de la minéralisation globale.

- L'aquifère éocène renferme des eaux dont le résidu sec² peut varier de 60 à 120 mg/l dans les secteurs proches du Fleuve (éventuellement rechargés), de 600 à 1000 mg/l dans les secteurs plus éloignés. Ces minéralisations plus élevées, mais encore acceptables, sont dues à la nature calcaire de la roche-réservoir, avec parfois des intercalations gypseuses (eaux sulfatées calciques) ;
- Les eaux du CT, grâce à la nature sableuse de l'aquifère, sont très peu minéralisées, avec des RS variant de 40 à 280 mg/l ;
- Les eaux du Maastrichtien, dont le réservoir est également sableux, sont également peu minéralisées, mais avec des variations notables dans l'espace : de 30 à 100 mg/l dans le Dande Mayo, de 120 à 750 mg/l dans le Diéri, de 230 à 730 mg/l dans le Ferlo ; ces variations

² Les résidus secs, non mesurés dans le cadre de l'inventaire, sont évalués par l'application de la formule moyenne RS (mg/l) = 0.65 x Conductivité µS/cm

reflètent d'une part la probabilité d'une recharge indirecte à proximité du Fleuve, de l'autre l'absence de recharge et l'existence de poches d'eaux anciennes plus salées dans le Diéri et vers l'Ouest du Ferlo.

I.A.3.b. Fluor

Contrairement aux régions plus occidentales du pays, aucun problème de concentration excessive en fluor n'est reporté pour le Maastrichtien de la région de Matam.

I.A.3.c. Fer

L'existence de concentrations excessives en fer constitue en fait le seul problème de qualité dans la région. Bien que non dangereux pour la santé humaine, l'excès de fer, qui se manifeste par une coloration rouge après aération de l'eau, peut avoir un effet dissuasif sur l'utilisation des eaux des réseaux (pouvant dans certains cas inciter à un retour vers les ressources traditionnelles). Il génère en outre de graves problèmes de colmatage (notamment au niveau des compteurs).

Les concentrations en fer total, mesurées sur le terrain, sont peu élevées dans l'Eocène, mais le sont nettement plus dans les aquifères sableux (CT et Maastrichtien) où elles peuvent varier fortement :

- dans le Dande Mayo, elles restent généralement faibles (<0,3 mg/l), mais peuvent cependant localement dépasser 1mg/l et même 3 mg/l ;
- dans le Diéri, elles sont très contrastées, variant en quelques Km de <1 mg/l à 3 à 5 mg/l, et même jusqu'à 20mg/l ;
- dans le Ferlo, elles varient également de <1 mg/l à plus de 4 mg/l

L'origine de ces variations rapides dans l'espace reste pour l'instant inexpliquée.

Le problème du fer dans les eaux présente des convergences notables avec celui de la qualité bactériologique, dans la mesure où un traitement va rapidement s'imposer dans les ouvrages à forte concentration en fer (notamment ceux desservant des populations importantes), et où d'importantes économies d'échelle pourraient résulter d'un traitement combiné du fer et de désinfection.

I.B. OBJECTIFS

I.B.1. Qualité bactériologique, un manque crucial de données

Ce manque a été mis en lumière en mars 2016, à l'occasion d'une réunion de présentation des résultats de l'inventaire DRH/ADOS. Le Directeur de l'OFOR, constatant que la synthèse des données permettait d'obtenir une bonne image de la qualité physico-chimique des eaux à l'échelle de la région, posait alors la question : « Mais qu'en est-il de la qualité bactériologique ? »

La réponse a tenu en un simple constat : mis à part le suivi réalisé par la SDE sur ses deux forages de Matam, aucune analyse bactériologique, récente ou ancienne, n'était alors disponible, et en réalité personne ne connaissait la qualité bactériologique des eaux distribuées dans la région.

Deux raisons principales expliquent ce constat :

- la technicité nécessaire à la réalisation de prélèvements dans les conditions requises,
- et la difficulté de réalisation des analyses bactériologiques proprement dites dans la région où il n'existe pas de laboratoire d'analyse compétent dans ces techniques.

En fait, les contacts pris avec le Service National d'Hygiène en mai 2018 ont montré que cet organisme effectuait des contrôles de la qualité des eaux distribuées (branchements privés ou publics) à l'occasion de leurs campagnes de mesure et/ou à l'occasion de collaborations avec la Division Régionale de l'Hydraulique et certains programmes portés par des associations au niveau local. Ces campagnes, dont les résultats semblent rester confidentiels, seraient destinées à sensibiliser les usagers sur les bonnes pratiques d'entretien des installations, de stockage et

d'utilisation des eaux. Cependant, aucune mesure des eaux brutes, ni recherche de l'évolution de la qualité lors de son transit dans les réservoirs et les réseaux ne semble effectuée.

Depuis 2016, cette question de la qualité bactériologique des eaux est apparue clairement comme l'une des préoccupations majeures de l'ensemble des acteurs de l'eau de la région de Matam. Par exemple, la question de la mise en place d'unité de chloration sur certains sites commence à être étudiée par les services de l'Etat, mais sans données qualitatives sur lesquelles s'appuyer.

D'où l'importance de la présente étude expérimentale, destinée à vérifier dans quelle mesure les eaux distribuées pour la consommation humaine sont réellement potables, et, si elles sont contaminées, quelles en sont les causes, et les améliorations à apporter pour qu'elles acquièrent et conservent une potabilité permanente.

I.B.2. Présentation des objectifs

Pour répondre à cette préoccupation de l'OFOR et des acteurs locaux, ADOS a proposé dès 2016 une mission d'évaluation dont l'objectif était de caractériser la qualité bactériologique d'un échantillon de forages représentatif de la région de Matam, puis d'en déduire une première image de la qualité globale des eaux distribuées à l'échelle de la région.

Secondairement, cette mission permettrait de tester la faisabilité d'un futur dispositif pérenne de contrôle de la qualité bactériologique en zone rurale (à l'instar de ce qui existe déjà en zone urbaine), et éventuellement d'en poser les bases.

Plus concrètement, les objectifs suivants ont été définis :

➤ **Etablir un programme de prélèvements** pour analyses bactériologiques sur un nombre de sites suffisant pour couvrir la gamme des situations-types en matière d'adduction d'eau potable en région de Matam.

Ce programme concernera en premier lieu des forages mécanisés pour lesquels la production d'eau potable constitue la vocation unique ou une vocation majeure.

De façon à permettre une comparaison de ce type de captages avec les ressources traditionnelles toujours utilisées pour l'alimentation humaine, un programme annexe de prélèvements dans quelques puits et dans des ressources traditionnelles (fleuve Sénégal, défluent, mares) lui sera adjoint.

➤ **Mettre en place à titre expérimental un système allant du prélèvement d'échantillons à l'analyse** de laboratoire par du personnel qualifié, appliquant les techniques reconnues en matière de prélèvement, transport et analyses bactériologiques.

➤ **Réaliser le programme de prélèvements et d'analyses** sur une période suffisamment longue pour couvrir l'éventail des situations climatiques (période de basse consommation et période de pointe, saison humide et saison chaude, etc. ...) et pour éprouver le dispositif mis en place, ainsi que pour disposer d'un jeu d'analyses suffisant pour être représentatif.

➤ **Effectuer la synthèse des résultats**, et en déduire des conclusions sur le **risque bactériologique** dans les forages d'eau à vocation d'eau potable en région de Matam ; comparer les résultats relatifs aux adductions par forage à ceux des puits et des eaux de surface.

La synthèse des résultats sera menée en recherchant à caractériser le phénomène de la contamination bactérienne : est-elle partiellement ou totalement aléatoire, ou plus ou moins nettement liée à un certain nombre de facteurs ?

- Facteurs liés aux équipements : forages, pompes, équipements de stockage (types de réservoir), de distribution (réseaux)
- Facteurs liés à la gestion de l'eau : propreté des installations, organisation de la distribution de l'eau pastorale et domestique, savoir-faire des ASUFOR
- Autres facteurs : saisonnalité, structure et longueur des réseaux, ...

- Sur la base de cette synthèse, mener une **réflexion sur la production d'eau potable** dans cette région : part de l'eau potable dans les différentes sous-régions, intérêt d'une éventuelle spécialisation des forages, analyse préliminaire des **solutions préventives et curatives**, définition d'un **ordre de priorités**.
- Organiser la **diffusion des résultats** pour en assurer la bonne compréhension (en évitant les interprétations hâtives) et la prise en compte effective par les gestionnaires des adductions d'eau avec l'aide des autorités régionales: conseils aux ASUFOR, aide à la mise en place des solutions préventives, sensibilisation des usagers.
- **Préparer la pérennisation** de la chaîne « Prélèvements de terrain – analyses – interprétation » dans la perspective de la montée en puissance du suivi bactériologique des eaux brutes, et bientôt des eaux traitées, en région de Matam.

II. METHODOLOGIE

II.A. PRESUPPOSES

Dans un forage réalisé dans les règles de l'art et exploité régulièrement par une pompe immergée, on peut considérer que l'eau arrivant en surface est pure d'un point de vue bactériologique. Il n'existe pas en effet de possibilité de contamination bactériologique dans les aquifères, surtout quand ils sont sableux et donc dotés d'un haut pouvoir de filtration à l'état naturel.

Cependant, cette bonne qualité originelle est susceptible de s'altérer, dans des proportions très variables selon les cas :

- dans les forages dont la tête est mal protégée
- dans les réservoirs, châteaux d'eau et surtout réservoirs au sol,
- dans les réseaux,
- dans les contenants qui servent au transport et au stockage domestique de l'eau (bidons, chambres à air, jarres,...).

Malgré ces risques de contamination au niveau du stockage et de la distribution de l'eau, il reste très probable que l'eau des adductions alimentées par forage soit, globalement, de qualité bactériologique bien meilleure à celle des puits, et surtout à celle des eaux superficielles.

II.B. NECESSITE D'UN ECHANTILLON TEMOIN DE SITES

On appelle ici « site » l'ensemble constitué par un point d'eau (forage utilisé pour l'eau potable, ou exceptionnellement puits raccordé à un réseau d'eau potable) et par le dispositif de stockage (réservoir au sol ou château d'eau) et de distribution (bornes-fontaines, branchements collectifs et privés) qu'il alimente. Par hypothèse, on a retenu pour évaluer le nombre d'analyses à effectuer que chaque site ferait l'objet, en moyenne, des prélèvements suivants :

- un prélèvement en sortie forage (c'est-à-dire à la sortie de la conduite de refoulement);
- pour les forages munis d'un château d'eau, un prélèvement en sortie de ce dernier;
- pour les forages munis d'un réservoir au sol, qui alimentent généralement des antennes vers des abreuvoirs ou des potences, mais également des prélèvements par siphons vers des bidons tractés sur des charrettes, on effectuera au moins un prélèvement dans des conditions à déterminer ;
- pour les forages alimentant un réseau, a priori trois prélèvements dans des branchements individuels ou collectifs (tête, milieu et extrémité du réseau) ; dans le cas d'alimentation en eau multi-villages (AEMV), on étudiera la possibilité de prélever également dans un village éloigné ;
- et, pour toute situation jugée intéressante, un prélèvement supplémentaire ;
- soit, en moyenne, 5 à 7 prélèvements par site.

D'autre part, compte tenu de la nécessité de limiter le nombre de sites prélevés à un niveau compatible avec une durée raisonnable de chaque campagne de prélèvement, ainsi qu'avec la capacité d'analyse du laboratoire, on a réduit ce nombre à 25 (en sachant que certains sites pourraient se trouver inaccessibles lors de la campagne d'hivernage).

II.C. CHOIX DES SITES

II.C.1. Critères de sélection

Les critères de sélection des sites retenus pour la constitution d'un échantillon-témoin représentatif ont été les suivants :

- Ensemble des forages réalisés dans le cadre du PHAR (soit 7 forages sur lesquels un suivi à long terme est envisagé).
- Sites urbains, sièges d'une population importante, et apparaissant ainsi comme prioritaires dans un futur programme d'amélioration de la qualité bactériologique des eaux distribuées. La ville de Matam étant pour l'instant la seule à disposer d'une adduction de type urbain avec système de potabilisation. Un diagnostic de la situation dans les villes d'Ourossogui (24 000 habitants), de Waoundé (12 000 habitants, sur laquelle ADOS développe par ailleurs un programme d'assainissement), de Thilogne (16 000 habitants), semblait incontournable.
- Sites gérés par des ASUFOR dynamiques, motivées par une amélioration de leur service. C'est le cas par exemple de Soryngo et Thilogne.
- Forages à vocation dominante d'AEP dont l'eau contient du fer à un niveau élevé, et alimentant également une population importante.
- Sites facilement accessibles (proches d'une route goudronnée ou accessibles par une bonne piste), et facilement intégrables dans un itinéraire permettant de prélever deux, parfois trois sites dans la même journée, et de retourner au laboratoire pour y déposer les échantillons dans un délai compatible avec les contraintes de leur bonne préservation.

Cependant, pour éviter de concentrer les prélèvements sur le Diéri et le Dandé Mayo au détriment du Ferlo, il était nécessaire d'intégrer quelques forages éloignés (Velingara, Dayanne Guélodé).

➤ Sites représentatifs d'un type d'équipement donné : pour analyser l'influence probable des différents types d'équipement, il convient, dans la mesure du possible, de sélectionner dans l'échantillon :

- des sites comportant des châteaux d'eau et d'autres comportant des réservoirs au sol (qui donnent lieu à un autre type de distribution)
- des forages solaires (installations prévues pour nécessiter très peu d'interventions humaines)
- des forages équipés de pompes immergées et de pompes à axe vertical

➤ Forages captant les différents aquifères : bien qu'il soit peu probable que l'âge de l'aquifère, ou la profondeur du captage, rentre en ligne dans les risques de contamination bactériologique (nappe superficielle éocène mise à part), il semble important de ne pas analyser que des forages au Maastrichtien, et d'inclure au moins deux forages au CT, et si possible un à l'Eocène.

D'autre part, comme certaines AEP sont alimentées par des puits (comme les deux puits d'Agnam Lidoubé, qui refoulent dans le même château d'eau), il semble intéressant d'en inclure une dans l'échantillon-témoin. En effet, même s'ils sont situés dans un périmètre de protection, les puits en question sont nettement plus vulnérables, d'abord au niveau de l'aquifère lui-même (Eocène en position superficielle, avec présence de bancs calcaires où la filtration naturelle est moindre), ensuite au niveau des puits eux-mêmes.

Le tableau ci-après récapitule, pour chaque site retenu, les critères déterminants et secondaires pour sa sélection. D'autres critères y sont mentionnés, comme l'âge des forages. Quant aux aquifères captés, ils ne constituent pas des critères absolus, mais sont mentionnés de façon à compléter le profil des forages sélectionnés.

Tableau II.C.1 : Critères de sélection des sites retenus

Critère déterminant 

Critère secondaire 

N° BDD	Nom captage	PHAR	ASUFOR	Population	Localisation	Age	Solaire	Puits AEP	PAV	Réservoir au sol	Fer	Maa.	C.T.	Eocène
57	Agnam Civol													
15	Agnam Lidoube P1													
63	Bagonde													
84	Dayanne Guelode													
20	Dendoudy F2													
88	Dialloube Diamouguel F2													
89	Diamouguel Dialloube													
110	Garly													
111	Gassambery													
117	Goumal													
0	Loumbol Samba Abdoul													
36	Mberla Bele													
205	Mbounguiel													
23	Oourossogui F1													
24	Oourossogui F2													
25	Oourossogui F3													
160	Pethiel Abou Toukal													
161	Ranerou													
9	Soryngo													
177	Thialy													
3	Thiemping													
186	Thilogne F3													
190	Toubel Bali F2													
194	Velingara F3													
1	Waounde													

II.C.2. Campagne préliminaire

Les premières tournées de terrain destinées aux repérages des sites présélectionnés et à la mise en place de l'équipe ont été l'occasion de tester une approche simplifiée des méthodes IDDEX (tests de « présence / absence » pour les coliformes totaux et les Escherichia coli).

Dix-huit points ont été ainsi testés. Ces analyses sommaires, réalisées dans des conditions parfois peu optimales, permettent toutefois d'avoir une première indication sur la qualité des eaux.

Tableau II.C.2 : Résultats de la campagne préliminaire

n° BDD	Nom	n° prélèv	Lieu de prélèv.	Date prélèv.	C.TOT	E.coli
63	Bagonde	1	Sortie forage	31/01/2017	<1	<1
63	Bagonde	2	Sortie C.E.	31/01/2017	2	<1
9	Soryngo	2	Sortie C.E.	01/02/2017	12	2
8	Ouro Sidy	2	Sortie C.E.	01/02/2017	<1	<1
20	Dendoudy F2	1	Sortie forage (fuite)	02/02/2017	2	<1
20	Dendoudy F3	2	Sortie C.E.	02/02/2017	> 16	<1
15	Agnam Lidoubé P1	3	Tête de réseau proche C.E.	31/01/2017	9	2
110	Garly	2	Sortie C.E.	01/02/2017	> 16	2
177	Thialy	1	Sortie forage	01/02/2017	5	<1
177	Thialy	2	Sortie C.E. (prélèvt douteux)	01/02/2018	> 16	> 16
23	Oourossogui F1	1	Sortie forage	27/01/2018	<1	<1
24	Oourossogui F2	1	Sortie forage	27/01/2018	<1	<1
25	Oourossogui F3	2	Sortie C.E.	27/01/2018	> 16	<1
57	Agnam Civol	1	Sortie forage	31/01/2017	2	2
57	Agnam Civol	3	B.F.	31/01/2017	<1	<1
82	Danthiady F2	3	Tête de réseau proche C.E.	02/02/2017	12	<1
XX	Loumbol Samba Abdoul	2	Sortie C.E.	02/02/2017	<1	<1
161	Ranerou	6	Réservoir au sol	02/02/2017	> 16	12

Parmi les analyses réalisées, une seule sortie de forage (Agnam Civol) indique la présence de coliformes totaux et de *Escherichia coli*. Bien qu'en faible quantité, ce résultat semble surprenant car aucune contamination n'a été détectée sur la borne fontaine correspondant à ce forage (BF).

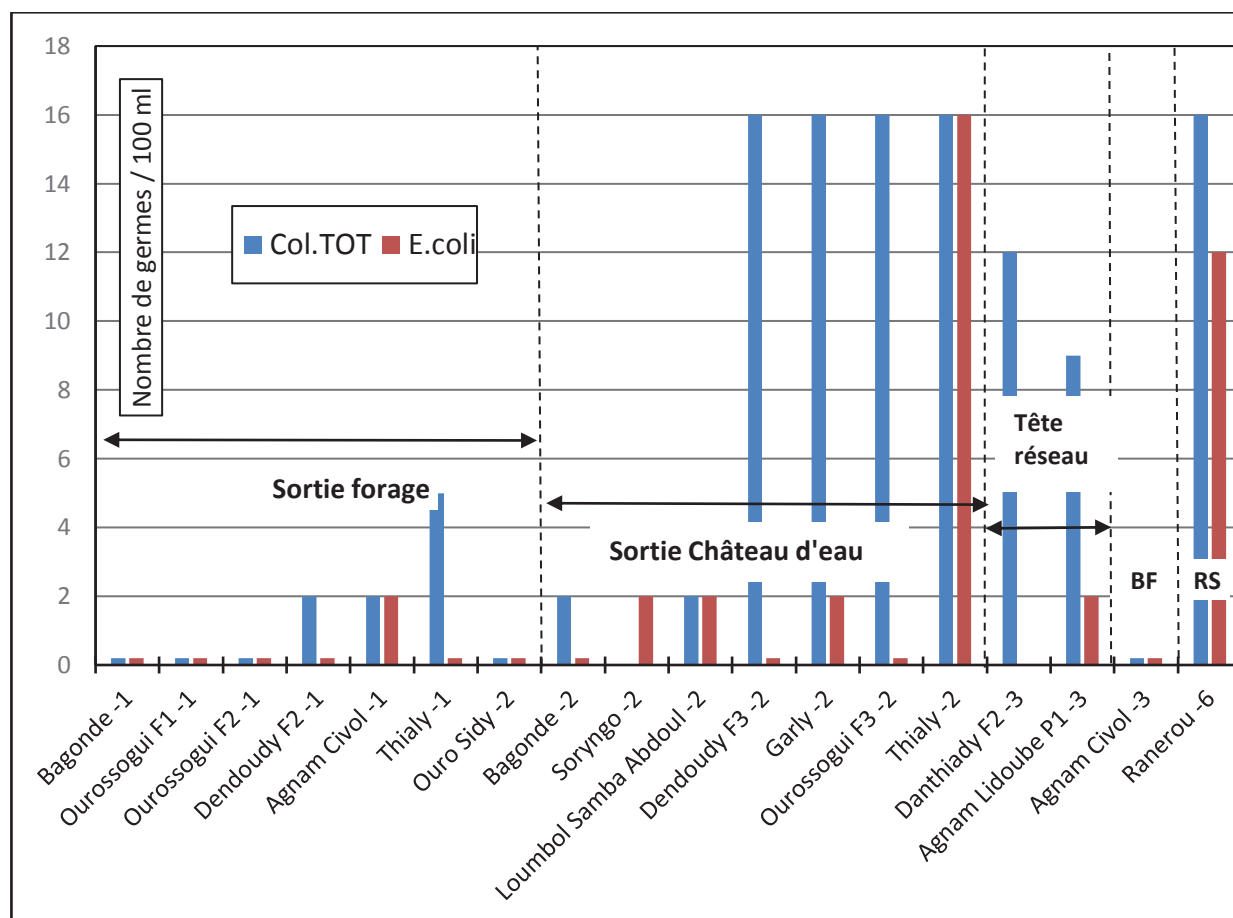
Les points où l'on retrouve le plus de coliformes totaux correspondent à des robinets situés en sortie de château d'eau et/ou en tête de réseau de distribution.

Le point le plus contaminé (Thialy, sortie château d'eau) pourrait correspondre à un problème de désinfection lors du prélèvement, ce qui pourrait expliquer cette contamination³. Les résultats pour ce point sont donc à manipuler avec précaution.

Enfin, l'analyse effectuée sur le réservoir au sol (RS) de Ranérou est représentative d'une eau principalement utilisée pour l'abreuvement du bétail. Le prélèvement a été effectué par immersion d'un seau dans le réservoir, sans désinfection.

³ En fait, les 4 campagnes effectuées par la suite ont confirmé ce fort niveau de contamination, il ne s'agissait donc pas d'un problème de prélèvement. Et en règle générale, quasiment tous les résultats approchés de cette campagne préliminaire se sont trouvés confirmés par la suite, ce qui montre l'intérêt de cette approche simplifiée.

Figure II.C.1 : Résultats de la campagne préliminaire classés par types d'échantillons



En conclusion, ces premiers tests « présence / absence » semblent constituer un outil facile et bon marché, éventuellement utilisable dans l'avenir pour étendre le diagnostic à un plus grand nombre de points.

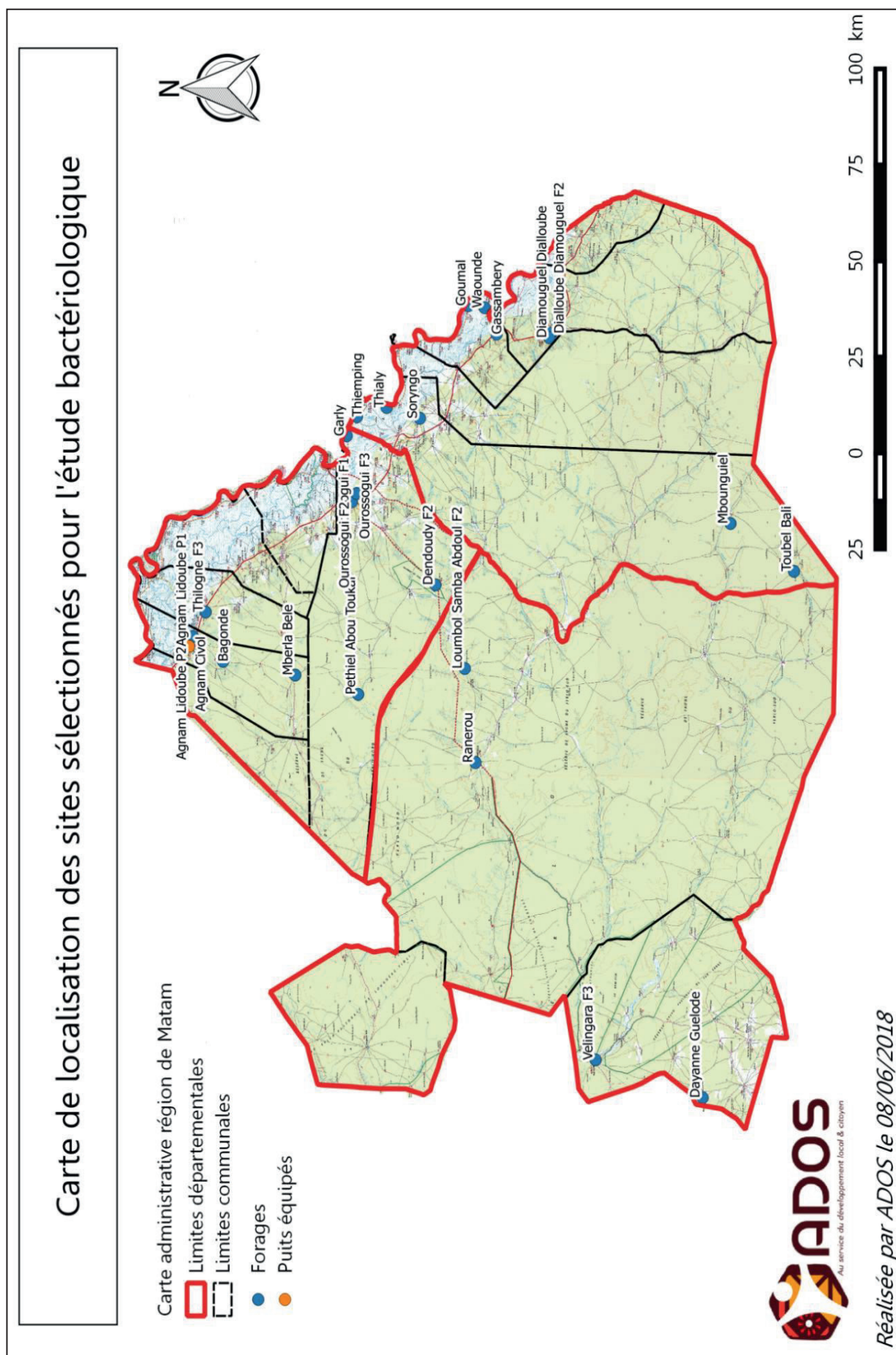
Les prélèvements effectués en sortie de forage semblent confirmer le présupposé que les eaux sont bactériologiquement peu ou pas contaminées à leur arrivée en surface. Le transit dans les châteaux d'eau semble s'accompagner, dans la majorité des cas, mais pas la totalité, d'une contamination. Pour les réseaux, le nombre d'échantillons est encore trop limité pour estimer le devenir des contaminations à l'aval des châteaux d'eau.

II.C.3. Liste définitive et typologie des sites retenus

Nom de l'ouvrage	Type	Département	Commune	Aquifère capté (attribué par le constructeur)	Profondeur totale (m)	Année de réalisation	Energie utilisée pour l'exhaure	Critères principaux de sélection
Agnam Civol	Forage	Matam	Agnam Civol	Maastrichtien	287	1977	Electrique (réseau SENELEC)	Population et ASUFOR
Agnam Lidoube P1	Puits équipé	Matam	Agnam Civol	Eocène	18	2003	Electrique (réseau SENELEC)	Puits équipé
Agnam Lidoube P2	Puits équipé	Matam	Agnam Civol	Eocène	18	?	Electrique (réseau SENELEC)	Puits équipé
Bagonde	Forage	Matam	Agnam Civol	Maastrichtien	261	2012	Thermique (groupe électrogène)	PHAR
Dayanne Guelode	Forage	Ranerou	Velingara	Continental terminal	131	2011	Thermique (groupe électrogène)	Localisation + CT
Dendoudy F2	Forage	Matam	Ogo	Maastrichtien	245	2011	Thermique (groupe électrogène)	PAV + RS
Dialloube Diamouguel F2	Forage	Kanel	Aoure	Continental Terminal	71	1993	Thermique (groupe électrogène)	CT + Fer
Diamouguel Dialloubé	Forage	Kanel	Aoure	Maastrichtien	194	2002	Electrique (réseau SENELEC)	Connecté avec DD F2
Garly	Forage	Matam	Ogo	Maastrichtien	94	2006	Solaire	Solaire
Gassambéry	Forage	Kanel	Orkadiere	Continental terminal prob.	60	1996	Thermique (groupe électrogène)	PHAR
Goumal	Forage	Kanel	Orkadiere	CT / Maastrichtien sup.	82	2013	Thermique (groupe électrogène)	PHAR
Loumbol Samba Abdoul F2	Forage	Ranerou	Oudalaye	Maastrichtien	330	2015	Thermique (groupe électrogène)	Localisation
Mberla Bele	Forage	Matam	Agnam Civol	Maastrichtien	184	2011	Thermique (groupe électrogène)	PHAR + local.
Mbonguieul	Forage	Kanel	Wourou Sidi	Maastrichtien	372	2013	Thermique (groupe électrogène)	PHAR + local.

Nom de l'ouvrage	Type	Département	Commune	Aquifère capté (attribué par le constructeur)	Profondeur totale (m)	Année de réalisation	Energie utilisée pour l'exhaure	Critère principal de sélection
Oourossogui F1	Forage	Matam	Oourossogui	Maastrichtien supérieur / Continental Terminal	91	1996	Electrique (réseau SENELEC)	Population
Oourossogui F2	Forage	Matam	Oourossogui	Maastrichtien supérieur / Continental Terminal	96	2008	Electrique (réseau SENELEC)	Population
Oourossogui F3	Forage	Matam	Oourossogui	Maastrichtien	100	2009	Thermique (groupe électrogène)	Population
Pethiel Abou Toukal	Forage	Matam	Ogo	Maastrichtien	231	2014	Thermique (groupe électrogène)	PHAR
Ranerou	Forage	Ranerou	Oudalaye	Maastrichtien	322	1952	Thermique (groupe électrogène)	Localisation + RS
Soryngo	Forage	Kanel	Ouro Sidi	Maastrichtien	114	2008	Electrique (réseau SENELEC)	ASUFOR
Thialy	Forage	Kanel	Ouro Sidi	Maastrichtien	92	2006	Solaire	Solaire
Thiemping	Forage	Kanel	Ouro Sidi	Alluvions / Continental Terminal / Maastrichtien supérieur ?	91	1998	Thermique (pompe thermique)	P.A.V.
Thilogne F3	Forage	Matam	Dabia	Maastrichtien	200	2005	Electrique (réseau SENELEC)	Population et ASUFOR
Toubel Bali F2	Forage	Kanel	Toubel Bali	Maastrichtien	456	2014	Thermique (groupe électrogène)	PHAR
Velingara F3	Forage	Ranerou	Velingara	Maastrichtien	?	2009	Thermique (groupe électrogène)	Localisation + RS
Waounde	Forage	Kanel	Waounde	Continental Terminal	67	1998	Electrique (réseau SENELEC)	Population et ASUFOR

Carte 1 : Localisation des sites sélectionnés pour l'étude bactériologique



II.D. TRAVAUX PRELIMINAIRES AUX CAMPAGNES DE MESURE

Parmi les forages sélectionnés, peu étaient dotés de systèmes permettant d'effectuer des prélèvements en respectant les normes en vigueur pour les analyses bactériologiques, notamment en sortie de forages et en sortie de réservoirs.

Or, pour éviter tout risque de contamination accidentelle risquant de fausser les résultats, les prélèvements d'eau en vue d'analyses bactériologiques doivent être effectués dans un respect strict de règles d'hygiène. Les points de prélèvement doivent notamment être désinfectés à la flamme afin de détruire une éventuelle contamination liée à l'environnement.

La première opération de ce programme expérimental a donc consisté en une reconnaissance complète des sites retenus, de façon à déterminer exactement où et comment seraient réalisés les prélèvements, et à dresser la liste d'un certain nombre de travaux préparatoires : poses de robinets sur les aménagements de tête des forages, vérification ou remplacement des robinets en sortie de réservoirs.

Ces travaux ont ensuite été réalisés pendant le mois de Mars 2017.

II.E. ECHANTILLONS D'EAUX DE Puits ET D'EAUX SUPERFICIELLES

Après concertation avec les partenaires, il est apparu intéressant d'inclure dans l'étude des points d'eau de puits et d'eau de surface, ressources traditionnelles encore souvent utilisées dans certaines zones pendant les mois qui suivent l'hivernage, du fait de leur gratuité. L'intérêt étant de vérifier l'hypothèse de base que les eaux superficielles et celles des puits traditionnels sont beaucoup plus contaminées que les eaux souterraines captées par forage, qui sont normalement exemptes de pollution bactérienne au sein des aquifères profonds.

Ainsi, six puits ont été identifiés (deux puits par département) et six points d'eau de surface (fleuve, défluent et mares temporaires).

II.F. MODES DE PRELEVEMENTS

Le prélèvement est une phase primordiale qui peut influencer les résultats et qui aide à leur interprétation. Il a été effectué dans les règles d'hygiène adéquates, conformément au guide de prélèvement AFNOR - FD T90-520 Octobre 2005 « Qualité de l'eau - Guide technique de prélèvement pour le suivi sanitaire des eaux en application du code de la santé publique » :

- Une purge de la canalisation doit être effectuée pendant quelques minutes afin de vidanger la quantité d'eau stagnant dans le réseau.
- Le point de prélèvement doit être désinfecté à la flamme (ou avec de l'alcool si impossibilité) afin de s'affranchir de la pollution potentielle liée à l'environnement.
- L'opérateur doit avoir les mains propres, désinfectées et ne doit être en contact avec l'intérieur des flacons stériles.
- Après prélèvement, les flacons doivent être rebouchés immédiatement et stockés à l'abri de la lumière dans une enceinte réfrigérée jusqu'à l'analyse.

Le prélèvement doit aussi permettre de collecter des informations importantes pour comprendre l'origine des pollutions éventuelles :

- Paramètres physico-chimiques (température de l'eau, pH, conductivité et concentration en fer).
- Météorologie (le climat peut influencer les conditions de prélèvement et/ou la qualité des eaux prélevées).
- Etat d'entretien des ouvrages (la vidange et l'entretien du château d'eau doit être faite régulièrement pour limiter les dépôts et les risques de contamination).

- Fonctionnement des installations (à titre d'exemple un château d'eau qui n'est rempli que tous les 4 jours en raison d'une demande en eau faible, suppose une stagnation des eaux pouvant entraîner une contamination).
- Toute autre information, remarque...

Il est important de préciser que, pour les eaux de surface et les eaux de puits, aucune désinfection n'est possible et les sources de contaminations sont multiples. Le prélèvement est donc effectué dans les conditions d'usage, au seau, par immersion du flacon. Les résultats sont donc à interpréter en fonction.

Dans tous les cas, les échantillons doivent être conservés au frais à environ 5°C pendant le transport et jusqu'à leur analyse qui doit s'effectuer dans les 24h qui suivent le prélèvement.

II.G. ANALYSES

II.G.1. Choix du laboratoire

Il n'existe pas de laboratoire d'analyse de l'eau dans la région de Matam et les analyses bactériologiques sont contraignantes (délai maximum de 24h).

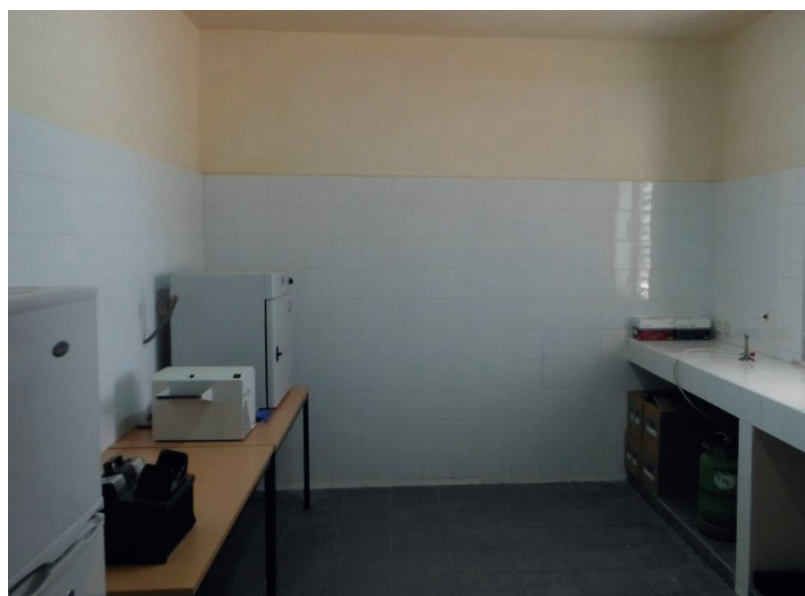
Certains points de prélèvement se trouvent dans des zones rurales très reculées, à plus de 4h de route de Matam, donc plus de 10h de route de Dakar. Il paraissait donc important pour la bonne réalisation des analyses de disposer d'un laboratoire au niveau régional.

De plus, dans le contexte actuel, la qualité de l'eau devient une préoccupation nationale et la mise en gestion déléguée des forages ruraux devrait inciter les gestionnaires à faire d'avantages de contrôles. Il a donc semblé stratégique de développer les compétences d'un laboratoire expérimental qui puisse devenir la référence en analyse bactériologique des eaux pour la région de Matam.

Pour cela, une étude préliminaire a été menée dans différents laboratoires d'analyses biologiques de la région afin de connaître leurs capacités techniques et leur intérêt pour cette nouvelle problématique. La qualité de l'eau de consommation étant liée avec la santé humaine, les hôpitaux qui disposent de laboratoires performants ont été ciblés.

C'est ainsi que l'Hôpital Régional de Matam, situé dans le chef-lieu de la région, de construction récente et disposant d'une pièce disponible pouvant être dédiée à l'analyse des eaux, a été contacté, puis, après discussion avec sa Direction, choisi pour y mener conjointement avec ADOS les analyses de cette phase expérimentale.

La majeure partie du matériel nécessaire pour l'analyse des eaux a été fournie par le partenaire technique français : le Laboratoire de la Drôme. Ce matériel sera cédé à l'hôpital de Matam à la fin de l'étude, si le programme est respecté et les objectifs initiaux atteints. Par ailleurs, les techniciens ont reçu une première formation dispensée par le Docteur Bertrand BEUGNIES, biologiste et responsable du Laboratoire de la Drôme, lors de sa mission en Janvier 2017. Ensuite, un accompagnement technique a été assuré tout au long des campagnes d'analyses, d'Août 2017 à Mai 2018.



II.G.2. Paramètres analysés

La contamination microbienne constitue le risque sanitaire le plus important concernant l'eau de boisson. La qualité microbienne de l'eau peut varier brusquement à cause de défaillances ponctuelles des systèmes de stockage ou de distribution des eaux.

Pour vérifier la qualité microbienne de l'eau, il convient de rechercher des microorganismes indicateurs de contamination fécale, le microorganisme de référence étant *Escherichia coli*. En effet, la présence d'*E.coli* dans l'eau de boisson témoigne d'une contamination fécale récente, c'est pourquoi c'est un paramètre important de suivi de la qualité de l'eau. Par contre, l'absence d'*E.coli* ne garantit pas l'absence de virus ou de protozoaires, plus résistants à certaines conditions environnementales et aux traitements. L'analyse d'autres microorganismes peut donc permettre d'améliorer le contrôle de l'eau de boisson et de mieux appréhender le risque sanitaire.

Cependant, les moyens matériels et techniques disponibles pour ce diagnostic ne permettant pas d'inclure l'analyse des microorganismes plus résistants tels que des spores bactériennes, des virus ou des parasites entériques, le choix a été fait de se limiter à la recherche de trois types de microorganismes indicateurs de la qualité de l'eau :

- Les bactéries coliformes totales
- *Escherichia coli*
- Les entérocoques intestinaux

II.G.2.a. Bactéries coliformes totales

Le groupe des bactéries coliformes totales est très diversifié, il comprend à la fois des espèces fécales et environnementales. Certaines de ces bactéries se retrouvent dans les matières fécales humaines et animales, mais de nombreux coliformes sont capables de se multiplier dans les eaux naturelles et dans les sols. Aussi, les coliformes totaux peuvent survivre et se développer dans les réseaux de distribution d'eau, à plus forte raison en présence de biofilms (ensemble de microorganismes fixés à une surface).

Les coliformes totaux ne sont donc pas utilisés comme indicateurs de contamination fécale, mais ils servent plus souvent à évaluer la propreté et le bon fonctionnement des réseaux de distribution.

Les bactéries coliformes totales devraient être absentes immédiatement après désinfection. Leur présence peut indiquer un traitement inadapté, la présence d'un biofilm ou une contamination liée à un élément étranger.

II.G.2.b. *Escherichia coli*

E. coli est considéré comme l'indicateur de contamination fécale le plus approprié car il est présent en grande quantité dans les matières fécales humaines et animales, et il est rarement observé en l'absence de contamination fécale. Dans les réseaux de distribution, les températures et les concentrations en nutriment ne devraient pas permettre sa croissance.

Ainsi, la présence d'*E. coli* dans l'eau potable est significative d'une contamination récente et peut permettre de mettre en évidence un traitement inapproprié ou des défauts d'étanchéité des réseaux.

II.G.2.c. Entérocoques intestinaux

Le groupe des entérocoques intestinaux est utilisé comme indicateur de contamination fécale car les entérocoques intestinaux sont généralement excrétés dans les matières fécales humaines et celles d'autres animaux à sang chaud. Leur avantage (d'un point de vue analytique) est qu'ils survivent plus longtemps dans les réseaux d'eaux traitées qu'*Escherichia coli* car ils résistent mieux à l'assèchement et la chloration.

II.G.3. Méthodes d'analyses

La méthode de filtration sur membrane est dite « classique » car normalisée en France. Elle consiste à filtrer 100ml d'échantillon sur une membrane qui retient les microorganismes et qui va ensuite être mise en culture sur une gélose spécifique. La gélose de différenciation étant peu sélective, la flore bactérienne générale peut perturber la fiabilité du dénombrement. C'est pour cela que cette méthode prévoit une confirmation de certains résultats par repiquage sur des géloses spécifiques, qui rallonge le temps d'attente pour obtenir les résultats. L'utilisation de cette méthode implique la fabrication locale de milieux de culture et une technique d'ensemencement spécifique.

Ce sont les raisons pour lesquelles la méthode d'analyse choisie est une méthode simplifiée dans sa mise en œuvre et son temps d'incubation. Elle a été développée par les Laboratoires IDEXX et ses résultats ont été validés par le Laboratoire de la Drôme qui est lui-même accrédité sur cette technologie. La méthode développée par IDEXX est basée sur une réaction enzymatique. Cette approche permet d'éviter les faux-positifs induits par la croissance non-désirée des microorganismes « non-cibles ». De plus, l'utilisation d'une plaque compartimentée en 51 puits évite la subjectivité du comptage des colonies sur boîtes.

Le choix de cette méthode présente différents avantages qui répondent à plusieurs contraintes :

- Facilité de mise en œuvre qui permet une autonomie rapide des techniciens (car tous les réactifs sont prêts à l'emploi).
- Rapidité d'exécution afin de ne pas surcharger de travail un service déjà en manque d'effectif.
- Rapidité d'obtention des résultats (entre 18h et 28h) fiables et objectifs.
- Méthodes éprouvées dans le domaine : méthode Colilert® normalisée NF EN ISO et méthode Enterolert® certifiée et validée AFNOR.

Pour effectuer l'analyse, on dispose de 100mL d'échantillon dans lequel on ajoute un réactif en quantité donnée :

- Colilert®-18 pour la recherche des coliformes totaux et des *Escherichia coli*, ou
- Enterolert®-DW pour rechercher les entérocoques intestinaux

Ces réactifs contiennent des composés (sondes ONPG, MUG et ortho-nitrophenyl-β-D-glucoside) qui produisent une coloration spécifique sous l'effet des enzymes présentes chez les microorganismes recherchés. Les coliformes utilisent leurs enzymes β-galactosidase pour métaboliser l'ONPG qui passe d'incolore à jaune. Les *E. coli* utilisent leurs enzymes β-glucuronidase pour métaboliser le MUG et générer une fluorescence (visible sous lampe UV). Les entérocoques métabolisent la sonde ortho-nitrophenyl-β-D-glucoside, faisant passer l'échantillon du bleu au vert.

Les grandes étapes de l'analyse sont :

- Ajout des réactifs en conditions stériles dans 100mL d'échantillon.
- Dissolution du réactif et homogénéisation de l'échantillon.
- Transfert du mélange « échantillon+réactif » dans une plaque Quantitray® (comportant 51 puits de 2mL) en conditions stériles.
- Fermeture de la plaque par scellement thermique (avec un « SEALER », appareillage spécifique).
- Incubation à 37°C pendant 18h à 22h pour la plaque Colilert®-18 et à 41°C pendant 24h à 28h pour la plaque Enterolert®-DW.
- Comptabilisation du nombre de puits colorés.

Sur les plaques Colilert®-18, la comptabilisation du nombre de puits jaunes permet le dénombrement des coliformes totaux, et la comptabilisation du nombre de puits à la fois jaunes et fluorescents permet le dénombrement des *E. coli*.

Sur les plaques Enterolert®-DW, la comptabilisation du nombre de puits verts permet le dénombrement des entérocoques intestinaux.

- Interprétation des résultats par lecture de la table d'interprétation.

La simplicité et la rapidité de mise en œuvre de cette méthode d'analyse sont un atout important dans le cadre de notre étude car cela a permis la formation rapide des techniciens tout en ne monopolisant pas leur temps de travail sur cette activité supplémentaire.

II.H. CAMPAGNES DE PRELEVEMENTS

Les prélèvements ont été réalisés par la chargée de mission qualité de l'eau d'ADOS. Les échantillons ont été systématiquement conservés dans une enceinte isotherme refroidie par des blocs de glace jusqu'à leur arrivée au laboratoire où ils ont été stockés dans un réfrigérateur. Ensuite, les analyses ont été réalisées dans les 24h qui suivent le prélèvement par les techniciens de l'Hôpital Régional de Matam, avec un accompagnement de la chargée de mission.

L'organisation établie entre ADOS et l'hôpital prévoyait l'analyse le soir même en rentrant des tournées de prélèvement, avec la personne de garde au laboratoire. L'objectif étant de respecter les délais d'analyse et de ne pas trop modifier l'organisation interne du laboratoire.

Le service de l'Hydraulique a accompagné ADOS sur quelques tournées de prélèvement afin de connaître les techniques de prélèvements et les différents points de contrôle.

Par ailleurs, une formation de terrain a aussi été effectuée avec le responsable du laboratoire de l'hôpital de Matam et un technicien du laboratoire.

Tableau II.H.1 : Récapitulatif des campagnes réalisées

Tableau récapitulatif des campagnes réalisées				
	<i>Campagne 1</i>	<i>Campagne 2</i>	<i>Campagne 3</i>	<i>Campagne 4</i>
Période de réalisation	Août 2017	Novembre-Décembre 2017	Février-Mars 2018	Avril-Mai 2018
Nombre total d'échantillons	105	132	131	132
Eaux de surface	5	4	4	4
Eaux de puits non-équipé	4	6	6	4
Eaux de puits équipé (sortie pompe)	1	2	1	1
Eaux de forage (sortie pompe)	20	24	25	25
Sortie château d'eau	21	24	23	23
Tête de réseau	20	23	24	25
Milieu de réseau	15	24	23	23
Fin de réseau	19	23	23	24
Réservoir au sol	0	2	2	3
Difficultés rencontrées	Hivernage : nombreux sites inaccessibles et établissements scolaires fermés pendant les vacances			

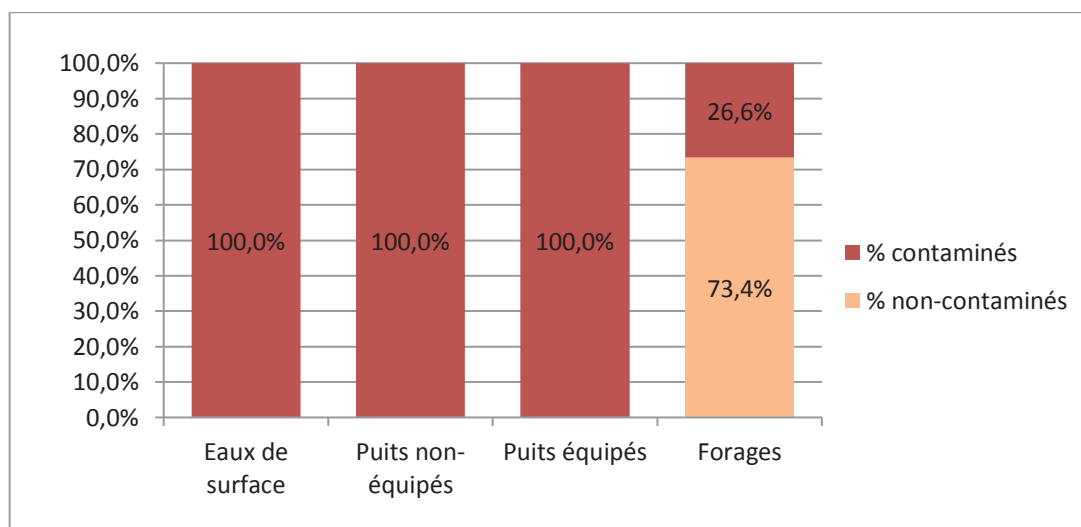
III. RESULTATS

III.A. QUALITE BACTERIOLOGIQUE EN FONCTION DE L'ORIGINE DES EAUX

Dans un premier temps, il s'agit d'étudier la contamination des eaux brutes en fonction de leurs origines (forages / puits / eaux superficielles). Ces premiers résultats prennent donc en compte toutes les campagnes d'analyse sans distinction.

Ici, nous considérons qu'il y a « contamination » lorsque l'analyse a permis de dénombrer au moins un *Escherichia coli* ou au moins un entérocoque intestinal dans 100 ml d'échantillon d'eau. Les coliformes totaux n'étant pas un paramètre significatif de contamination fécale.

Figure III.A.1 : Pourcentage de contamination des eaux selon leur origine



On constate alors que toutes les eaux de surface analysées sont contaminées. Le constat est le même pour les eaux issues des puits non-équipés et des puits équipés. En revanche, parmi les eaux prélevées en sortie de forage, des contaminations ont été détectées dans seulement 26,6% des échantillons.

Ces premiers résultats confirment donc l'hypothèse de départ : les eaux des forages sont nettement de meilleure qualité que les eaux de puits et que les eaux superficielles.

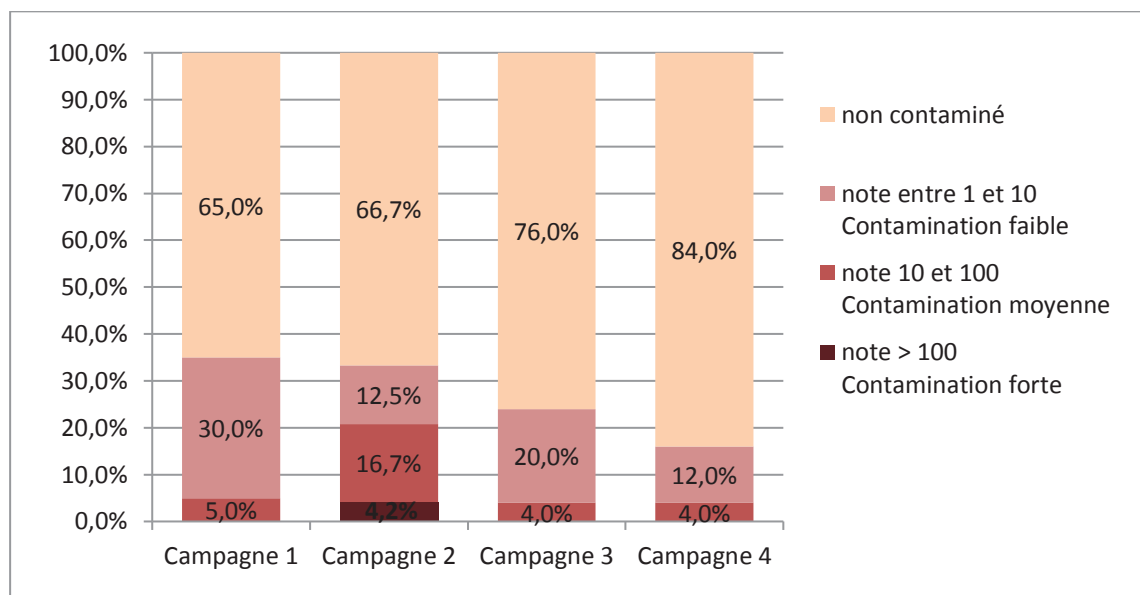
III.B. CONTAMINATION DES EAUX BRUTES DE FORAGE

Moins de 30% des eaux brutes de forage se sont révélées contaminées, mais il convient maintenant de préciser le niveau de ces contaminations. Pour cela, nous avons utilisé un système de notation basé sur le nombre de bactéries dans un échantillon de 100ml d'eau, ce qui permet de mieux visualiser les degrés de contamination. Ainsi, on peut distinguer 4 niveaux de contaminations :

- Non-contaminé (note inférieure à 1)
- Faible contamination (note comprise entre 1 et 10)
- Contamination moyenne (note comprise entre 10 et 100)
- Forte contamination (note supérieure à 100)

La figure suivante représente les différents niveaux de contamination, exprimés en pourcentages, pour chacune des quatre campagnes de mesure.

Figure III.B.1 : Niveaux de contamination des eaux brutes des forages par campagne



Pour l'ensemble des campagnes, la majorité des échantillons sont non-contaminés (avec un pourcentage croissant de la 1^{ère} à la 4^{ème} campagne), et lorsqu'il y a contamination, celles-ci est généralement faible. On retrouve aussi, à chaque campagne, des contaminations moyennes, mais sur un pourcentage plus faible d'échantillons. Et seule la 2^{ème} campagne a fourni un faible pourcentage de forte contamination.

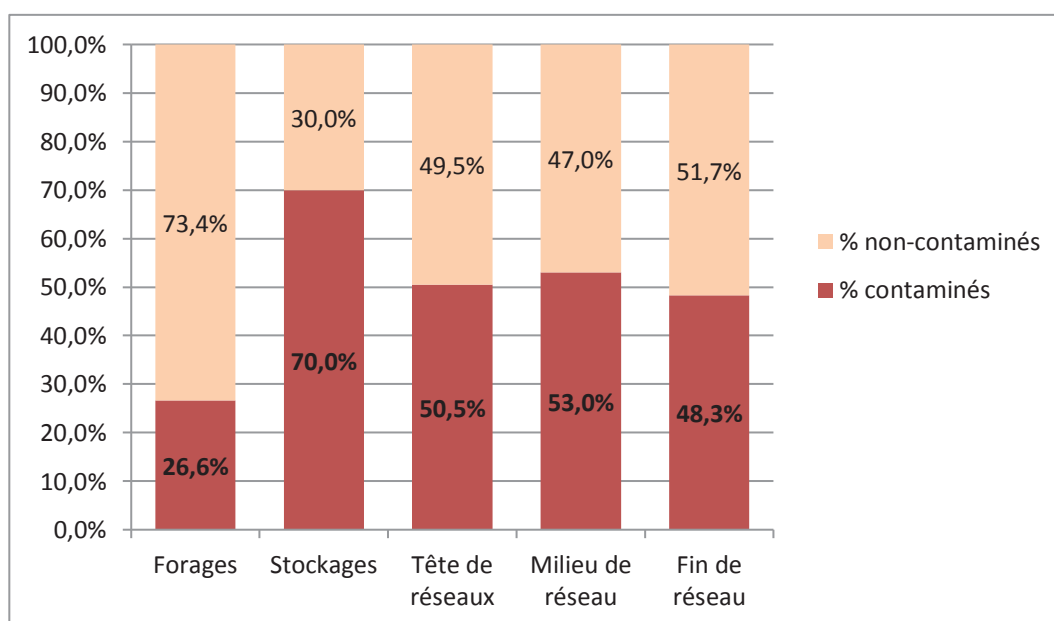
On remarque d'ailleurs que cette deuxième campagne semble significativement plus contaminée que les autres. Nous reviendrons plus loin sur l'influence de la saisonnalité sur les contaminations.

En conclusion de ce premier constat, on retiendra que les eaux sont majoritairement exemptes de contamination en sortie de forage. Mais le restent-elles pendant le stockage et la distribution ?

III.C. EVOLUTION DE LA QUALITE DES EAUX DE FORAGE APRES STOCKAGE ET DISTRIBUTION

La figure ci-dessous présente les contaminations, exprimées en pourcentage, sur la totalité des quatre campagnes, en fonction des lieux de prélèvement (forage / stockage / distribution) :

Figure III.C.1 : Evolution des pourcentages de contamination au cours du trajet de l'eau



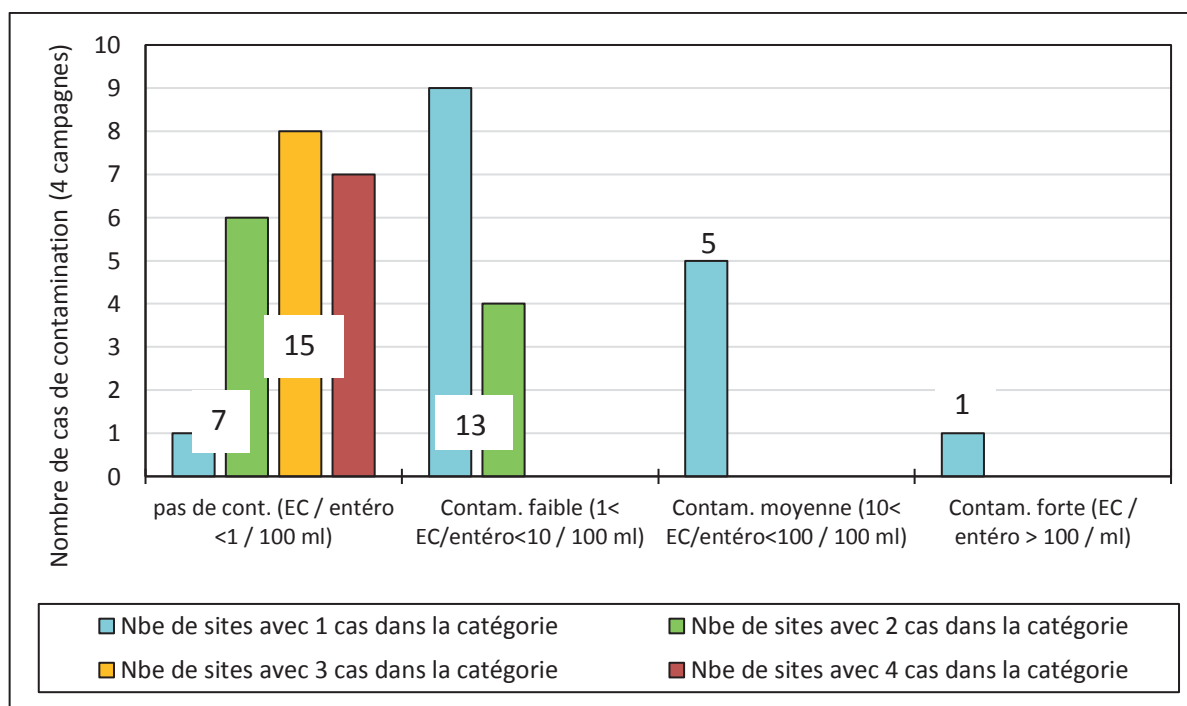
On observe une nette augmentation des contaminations dans les échantillons prélevés sur les sites de stockage. En revanche, les contaminations semblent diminuer sur les sites de distribution. Cette diminution pourrait correspondre à la non-viabilité des bactéries au cours de la distribution. Les ouvrages de stockage apparaissent donc comme des points d'entrée privilégiés pour les contaminations bactériennes.

III.D. CARACTERE ALEATOIRE OU SYSTEMATIQUE DES CONTAMINATIONS

Les contaminations sont-elles aléatoires, ou systématiques ? En d'autres termes, quand un forage est contaminé une fois, a-t-il plus de chances de l'être à nouveau ? Certains sites sont-ils systématiquement non contaminés, ou au contraire très contaminés ?

III.D.1. En sortie de forage (eaux brutes)

Figure III.D.1 : Caractère aléatoire ou systématique dans les eaux brutes



Pour faciliter la lecture, on dira que l'aléatoire correspond aux sites contaminés seulement 1 à 2 fois sur 4, le systématique 3 à 4 fois sur 4. On constate tout d'abord que les forages non contaminés le sont plus systématiquement (15 cas de 3 ou 4 contaminations successives), qu'aléatoirement (7 cas de forages contaminés 1 ou 2 fois).

Pour les contaminations faibles à moyennes, il n'y a que des cas aléatoires (respectivement 13 et 5). Et il n'y a qu'un seul cas de contamination forte.

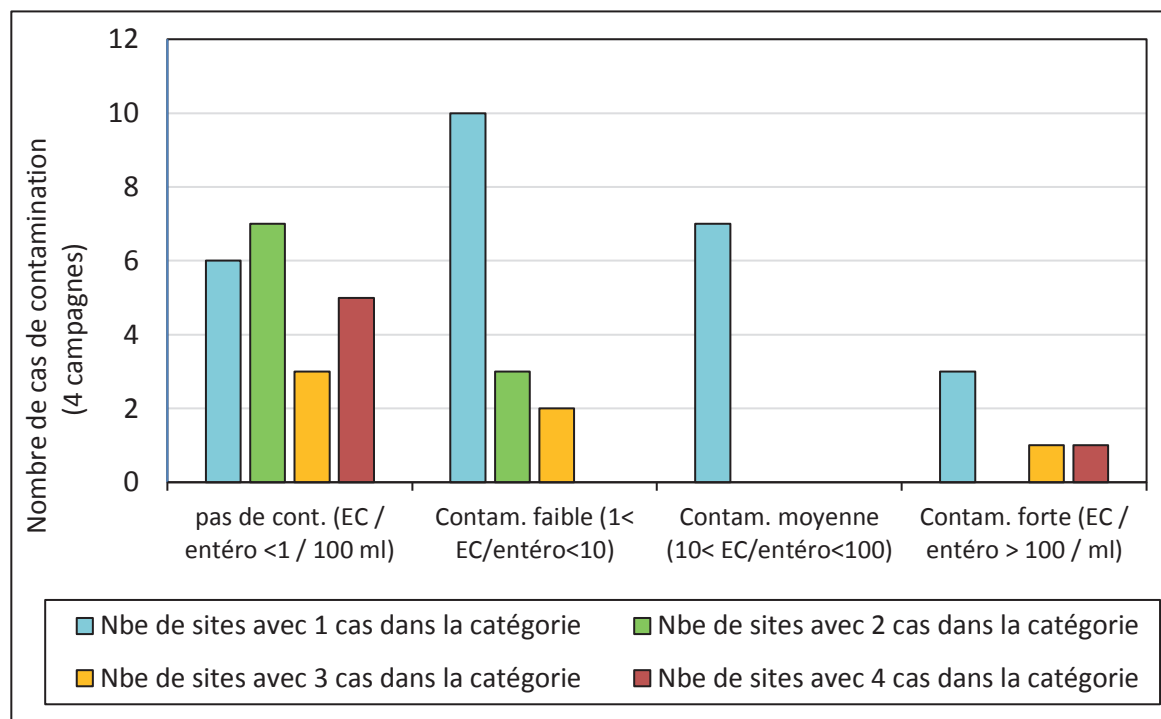
En conclusion, dans les eaux brutes, les rares cas de contamination sont aléatoires.

III.D.2. En sortie de réservoir

Cette tendance se renforce pour les contaminations faibles à moyennes.

Pour les 5 cas de fortes contaminations, 3 sont aléatoires (ne se sont produits qu'une fois), deux systématiques (3 fois pour le site de Thialy, 4 fois pour celui de Gassambéry).

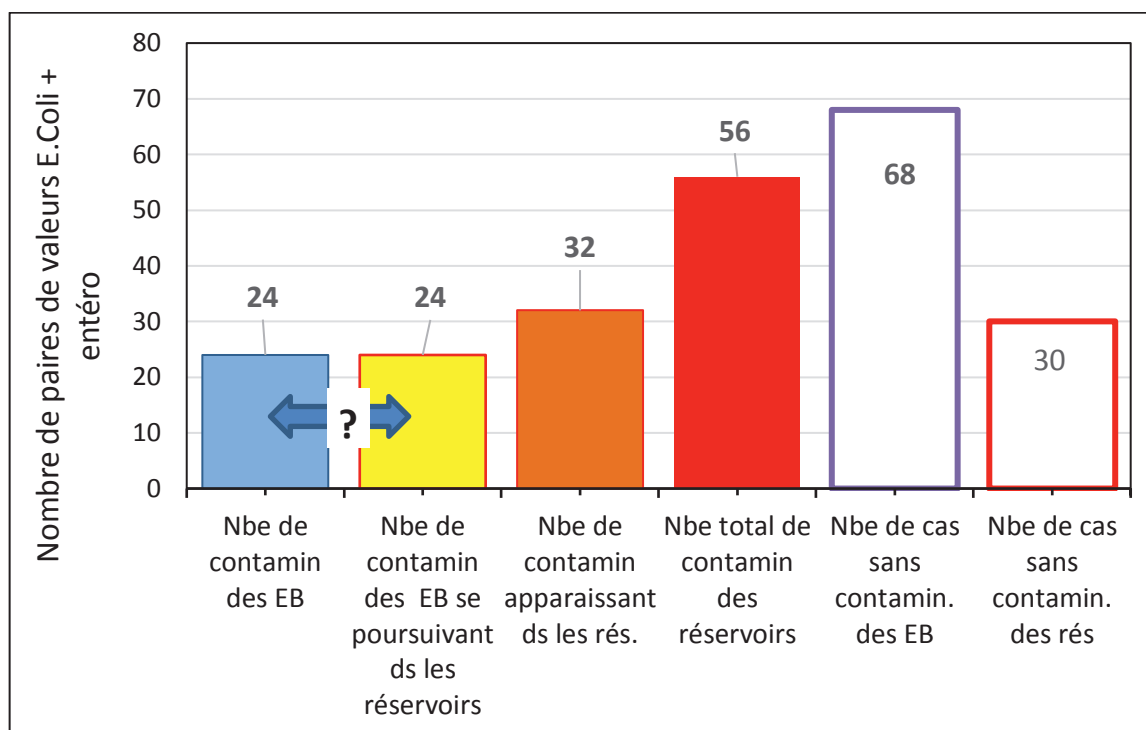
Figure III.D.2 : Caractère aléatoire ou systématique des contaminations en sortie de réservoir



Les cas de contamination systématique sont donc rares, mais ils existent. Voyons maintenant si la contamination des réservoirs est héritée des eaux brutes, ou bien si elle y apparaît.

Rappelons d'abord que, globalement, le stockage dans les châteaux d'eau fait passer le niveau de contamination de 27% à 70% des échantillons. Ensuite, on peut approcher le processus de propagation des contaminations en analysant comment évolue le nombre de contaminations (définies comme précédemment comme les cas où l'on observe pour chaque campagne au moins 1 *E. coli* ou 1 entérocoque) entre la sortie des forages et celle des réservoirs.

Figure III.D.3 : Propagation des contaminations dans les (ou à partir des) réservoirs



L'on peut alors observer :

- que dans les eaux brutes, on trouve 24 cas de contamination sur un total de $(24 + 68 = 92)$, soit 26%
- que toutes ces 24 contaminations se retrouvent dans les réservoirs, en s'aggravant systématiquement (puisque la note moyenne passe de 3.7 à 30)
- que par ailleurs de nouvelles contaminations naissent dans les réservoirs dans 32 cas (note moyenne 22), portant le nombre de cas à 56.

La double flèche qui relie sur le graphique les 24 cas de contaminations mesurées d'abord dans les « eaux brutes », c'est-à-dire en fait aux robinets de prise posés en tête des forages, puis dans les réservoirs, nous rappelle que, si un petit nombre de contaminations directes des eaux brutes peuvent trouver des explications (par exemple la prolifération des punaises à Soryngo se prolongeant jusqu'à dans le tubage du forage, voire une propagation d'eaux contaminées le long du tubage jusqu'au toit de crépines peu profondes à Gassambéry), d'autres cas, plus nombreux, semblent attester de contaminations en retour à partir des châteaux d'eau, ou tout du moins des colonnes de refoulement (retour par la crépine de la pompe d'eaux contaminées dans la partie aérienne de ces colonnes par défaut ou mauvais fonctionnement des clapets anti-retour).

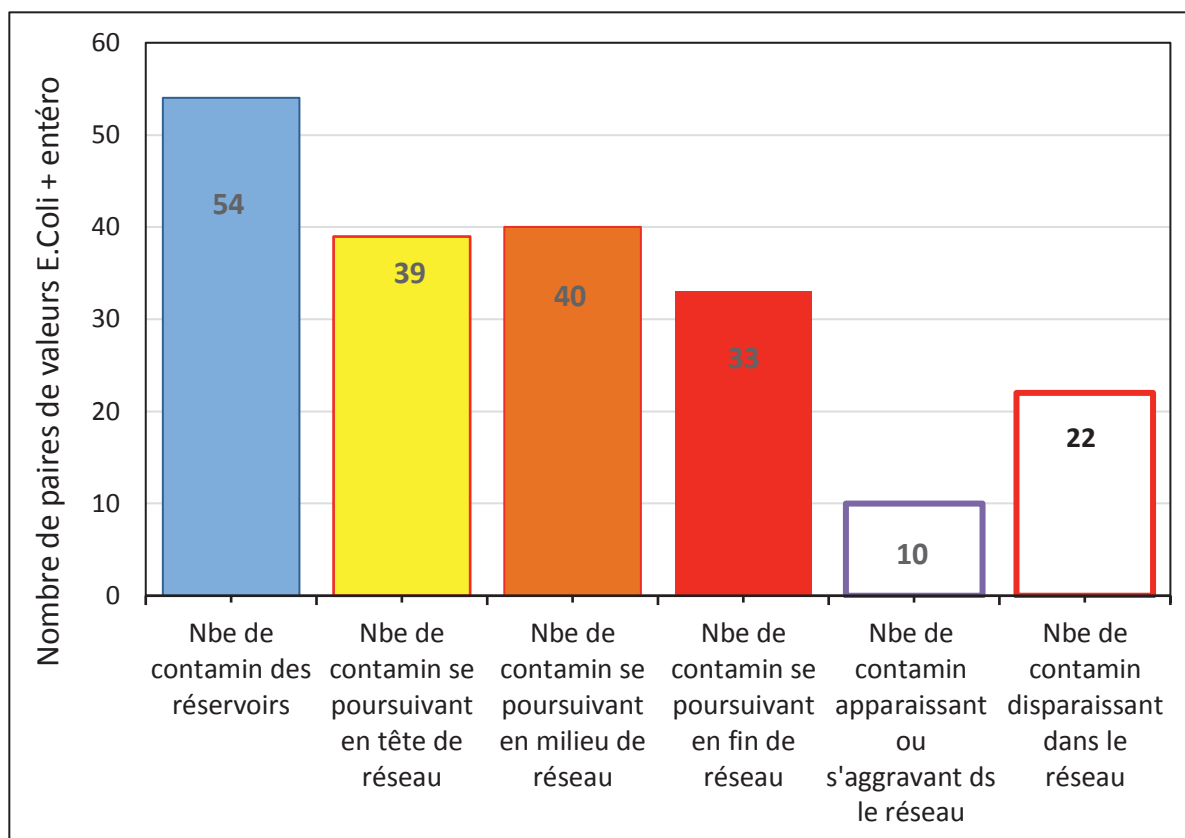
On retiendra donc que, non seulement le lieu de développement privilégié des contaminations est le réservoir de stockage (château d'eau), mais que dans un certain nombre de cas (forages solaires en particulier), la contamination des eaux brutes peut provenir des réservoirs, selon des processus qui seront analysés plus loin (paragraphe IV.G, Paramètres liés au séjour dans les réservoirs).

III.D.3. Dans les réseaux

Nous avons déjà vu au paragraphe précédent que, contrairement à ce à quoi on pourrait s'attendre a priori, les contaminations affectant les réservoirs n'ont pas tendance à s'aggraver dans les réseaux, mais plutôt à s'atténuer. Pour essayer de mieux comprendre, nous avons examiné plus en détail comment évoluaient les contaminations à l'aval des réservoirs (réservoirs au sol exclus).

Pour cela, nous avons effectué la même analyse que précédemment, pour comprendre le processus d'évolution des contaminations.

Figure III.D.4 : Propagation des contaminations dans les réseaux



Il ressort de ce graphique :

- Qu'à l'aval des 54 châteaux d'eau contaminés, seulement 39 têtes de réseau le sont encore; il y a donc 28% des cas où la contamination des réservoirs ne se propage pas ou disparaît rapidement en tête des réseaux ; ces cas correspondent majoritairement à de légères contaminations accidentelles d'entérocoques ;
- Que vers le milieu des réseaux, on retrouve la même proportion, avec une légère augmentation, non significative;
- Que par contre en extrémité des réseaux, on retrouve une nouvelle diminution, cette fois significative (-17%);
- Dans le détail, on peut noter sur les mêmes forages, une augmentation vers l'aval lors d'une campagne, une diminution lors d'une ou de deux autres;
- Mais globalement, on compte 22 cas de contaminations qui disparaissent dans le réseau, contre 10 cas de contamination qui apparaissent ou s'aggravent dans le réseau;
- Et parmi ces 10 cas, 2 sont des apparitions de contaminations graves.

Ces cas d'augmentation de la contamination dans les réseaux, même s'ils sont rares (25%), mériteront d'être analysés de près dans la recherche des solutions à apporter.

IV. RECHERCHE DES PARAMETRES EXPLICATIFS DES CONTAMINATIONS

IV.A. EFFET DE SAISONNALITE

La Figure III.B.1 : Niveaux de contamination des eaux brutes des forages par campagne, a mis en évidence une variation saisonnière des contaminations. En effet, les campagnes 1 et 2 ont présenté un maximum de contaminations. Avec comme point culminant la campagne 2 où les contaminations étaient plus fortes.

Rappelons que la campagne 1 s'est déroulée au mois d'Août 2017, donc en plein hivernage. Et que la campagne 2 s'est déroulée entre Novembre et Décembre 2017, donc en fin d'hivernage.

L'exploitation des forages peut varier fortement en fonction des saisons, notamment pour les forages à vocation pastorale. En effet, le bétail consomme beaucoup d'eau de forage en saison sèche, avec une nette augmentation des fréquentations des transhumants. En revanche, il retourne s'abreuver au niveau des mares et des petits cours d'eau qui se forment durant l'hivernage.

Le faible taux d'exploitation des forages pendant l'hivernage semble donc avoir un impact sur la qualité bactériologique des eaux brutes. Par ailleurs, la demande en eau étant plus faible, le temps de séjour augmente que ce soit à l'intérieur des tubages, dans les réservoirs, et dans les réseaux de distribution. L'influence de ce paramètre « taux d'exploitation » sera analysé plus en détail au paragraphe IV.G.

IV.B. CONDITIONS METEOROLOGIQUES LORS DES PRELEVEMENTS

Les prélèvements ont été réalisés selon les règles d'hygiène recommandées. Cependant, certaines conditions extérieures peuvent influencer l'échantillonnage.

Les sites de prélèvements se trouvent dans des zones rurales où évoluent de nombreux troupeaux. Les points de prélèvement sont souvent situés à l'extérieur des bâtiments (bornes fontaines, branchements individuels...) et sont donc exposés au vent et à la poussière.

Une particule de poussière provenant d'une aire animale bovine ou ovine est forcément très chargée en bactéries fécales. Lors du prélèvement, le vent peut emmener cette particule dans l'eau prélevée et engendrer ainsi une contamination environnementale. Le vent peut alors être considéré comme un facteur d'altération de la qualité du prélèvement.

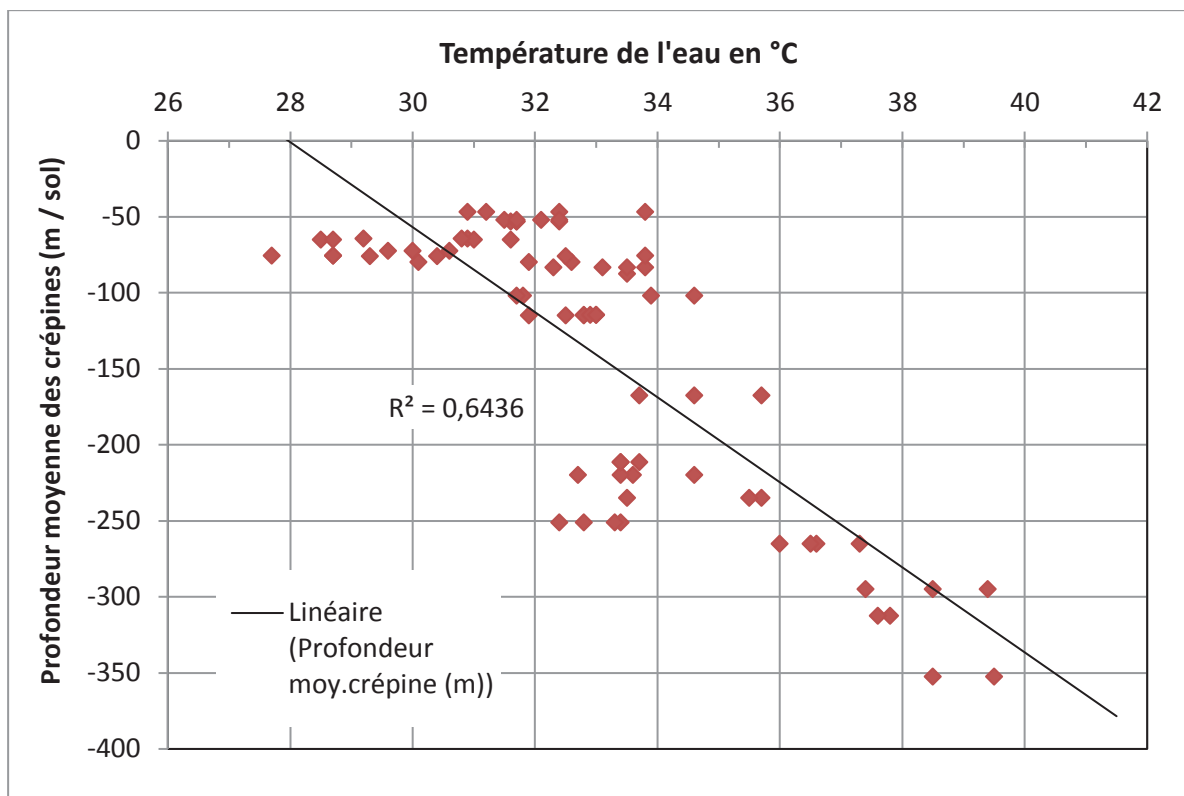
IV.C. QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES

Nous examinerons successivement les paramètres susceptibles d'intervenir dans le développement de contaminations

IV.C.1. Température

La température des eaux des captages étudiés varie, à son arrivée en surface, entre 27 et 39,5°C. Ces températures augmentent normalement avec la profondeur des couches captées, sous l'influence du gradient géothermique.

Figure IV.C.1 : Relation entre la température de l'eau en sortie forage et la profondeur moyenne des crépines

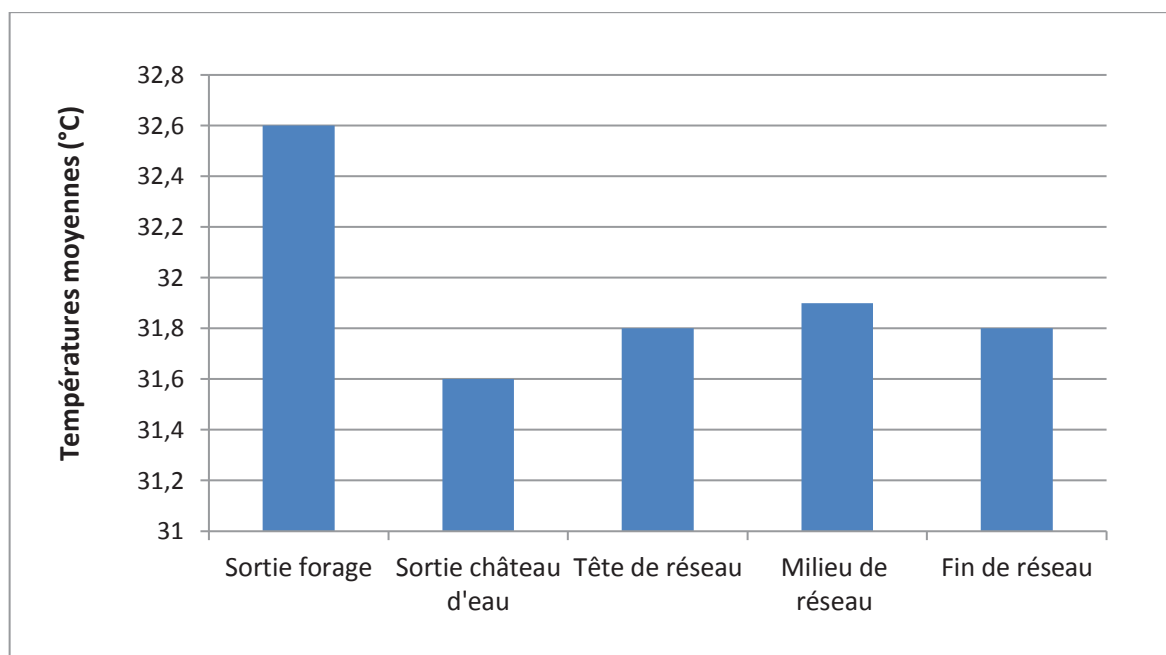


La relation obtenue est significative ($R^2=0,64$), avec un taux d'augmentation moyenne de la température, dû au degré géothermique, qui est ici de l'ordre de 4°C pour 100m. Elle est cependant loin d'être parfaite, parce que le facteur température est affecté de nombreux biais : évolution de la température avec la durée du pompage⁴, influence de la température extérieure, imprécision de la mesure.

En ce qui concerne la durée du pompage, il apparaît clairement qu'un certain nombre de températures anormalement basses viennent de ce que le pompage a été lancé depuis peu, et que la température n'était pas encore homogénéisée dans la colonne d'eau (ce qui nous a conduit à supprimer de l'échantillon 9 valeurs (sur 101) manifestement affectées de la sorte).

D'autre part, la température de l'eau subit une évolution lors de son trajet depuis la pompe immergée jusqu'au robinet. Ainsi, le graphique suivant a-t-il été réalisé en faisant les moyennes (toutes campagnes confondues) des températures mesurées dans les différents types d'échantillons. Les eaux sont globalement plus chaudes en sortie de forage et refroidissent ensuite dans les châteaux d'eau, pour enfin se réchauffer légèrement dans les réseaux.

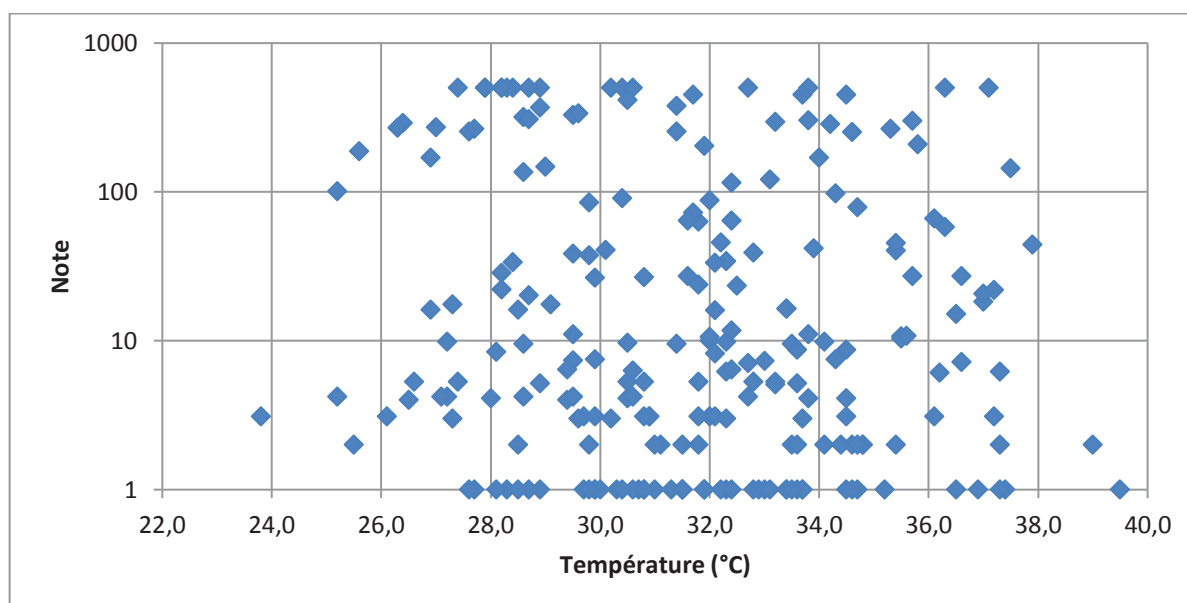
Figure IV.C.2 : Evolution de la température moyenne des eaux lors de leur trajet (production/stockage/distribution)



Enfin, dans les ouvrages hydrauliques de stockage et de distribution, la température des eaux est également affectée par la variation des températures de l'air aux échelles saisonnière et diurne. C'est ainsi qu'à la sortie d'un même réservoir, la température mesurée peut varier de 5 à 6°C d'une campagne à l'autre, et qu'en fin de réseau les écarts peuvent dépasser 9°C (réchauffement aux heures chaudes des conduites de faible diamètre dans leur trajet superficiel).

Quelle est alors l'influence de ces variations de température de l'eau sur la qualité bactériologique des échantillons analysés ? Dans un premier temps, considérons tous les échantillons sans distinction, et regardons si la température joue un rôle dans la contamination (représentée par la note correspondant au prélèvement).

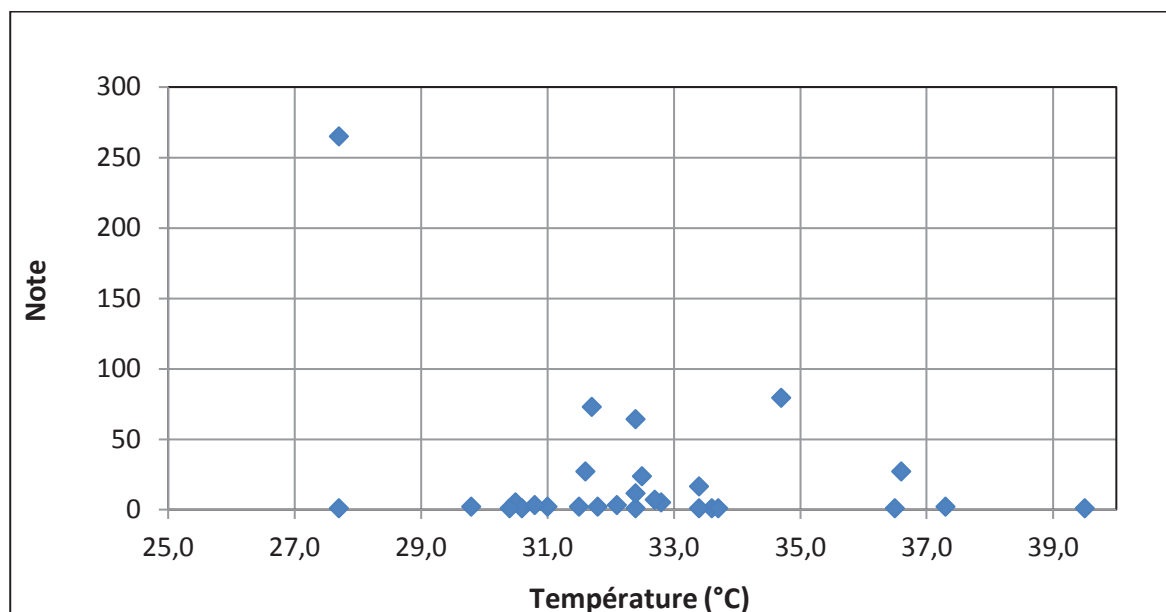
Figure IV.C.3 : Relation entre les notes de contamination et la température des eaux (tous échantillons)



On ne constate aucune corrélation, et en particulier, pas d'augmentation de la note avec la température.

Vérifions maintenant s'il en est de même lorsqu'on s'intéresse uniquement aux eaux brutes des forages. Parmi les 82 échantillons prélevés en sortie de forage, 29 présentent une contamination. En exploitant ce faible nombre d'échantillons contaminés, on obtient le graphique suivant, qui, à nouveau, ne révèle aucune relation entre les deux facteurs.

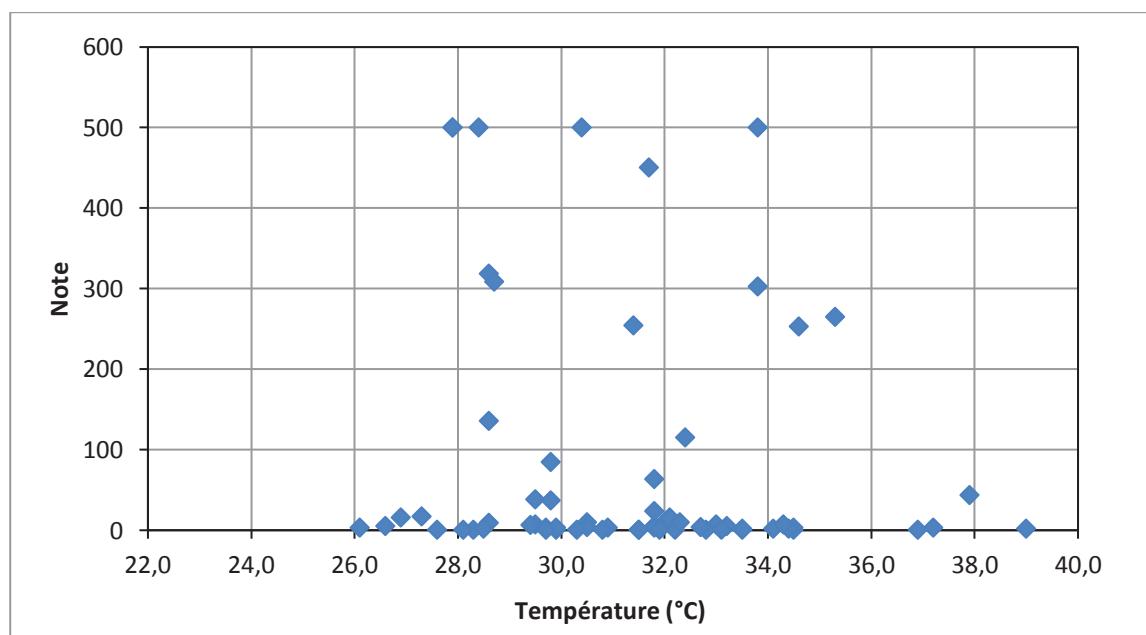
Figure IV.C.4 : Relation entre les notes de contamination des eaux brutes et la température



Qu'en est-il en sortie de réservoir ?

Sur 91 échantillons prélevés en sortie de réservoir, 64 sont contaminés, mais il n'y a pas non plus de corrélation entre la température des eaux en sortie de réservoir et leur contamination.

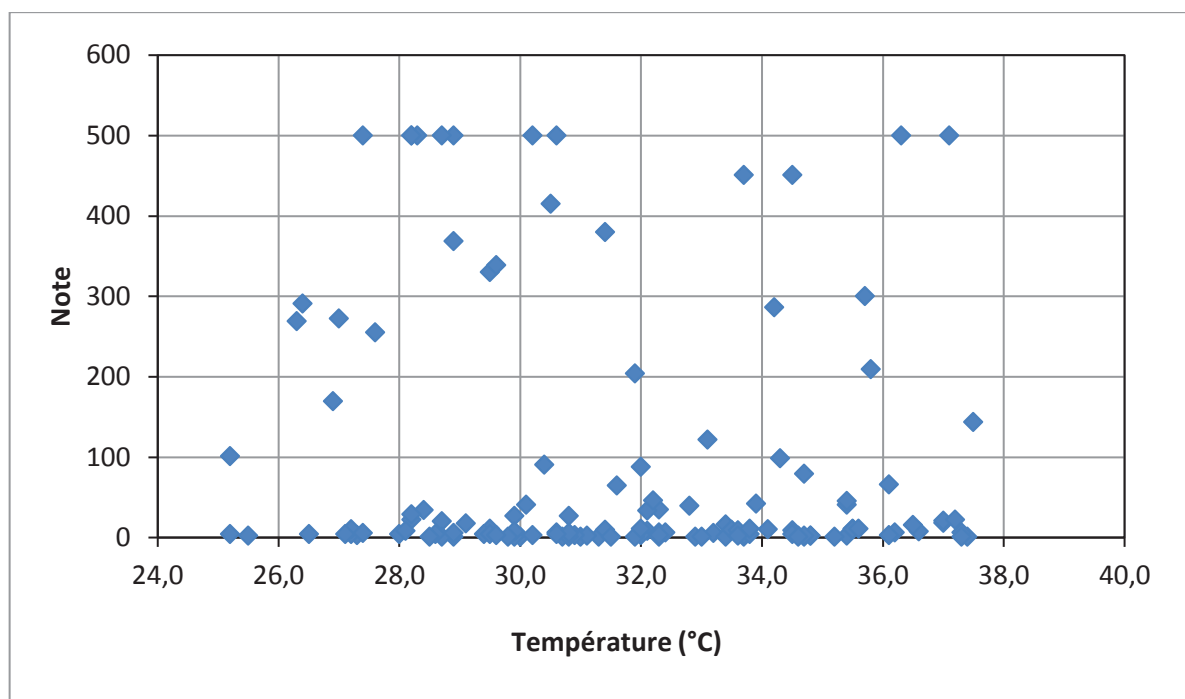
Figure IV.C.5 : Relation entre les notes de contamination des eaux en sortie de réservoir et la température



Et enfin l'absence de corrélation entre la température et la qualité bactériologique des eaux se vérifie-t-elle dans les réseaux de distribution ?

262 prélèvements ont été effectués sur les réseaux de distribution, parmi eux, 131 étaient contaminés et ont permis d'obtenir le graphique ci-après :

Figure IV.C.6 : Relation entre les notes de contamination des eaux prélevées sur le réseau de distribution et la température



Ces derniers résultats confirment que cette étude ne permet pas de mettre en évidence de lien particulier entre la température des eaux et leur contamination bactériologique.

IV.C.2. Salinité

Un simple examen des données confirme la logique, qui est qu'il ne saurait y avoir une quelconque relation entre la salinité d'une eau (exprimée par son résidu sec ou sa conductivité électrique) et sa qualité bactériologique. Ceci est également confirmé, si besoin était, par le fait (qui sera établi plus bas au paragraphe IV.D.3) qu'il n'existe pas non plus d'influence entre l'aquifère capté (chacun d'entre eux ayant ses caractéristiques propres en termes de salinité) et la présence ou l'absence de contamination.

IV.C.3. Concentration en fer

Le fer présent dans certaines eaux de forage en région de Matam provient des roches en contact avec les eaux souterraines (grès ferrugineux). En l'absence d'oxygène, le fer ne provoque pas de modifications de la couleur ni de la turbidité de l'eau. Cependant, lorsqu'il est exposé à l'air, il s'oxyde et donne à l'eau une coloration rouge-orangée. C'est ainsi que des eaux peuvent être incolores et translucides en sortie de forage mais deviennent troubles et orangées après oxygénation (contact avec l'air à l'intérieur d'un réservoir par exemple).

L'exposition sur une longue durée peut être préoccupante car elle peut entraîner une accumulation de quantité excessive de fer dans le corps. Certaines études basées sur les besoins journaliers en fer affirment qu'une concentration de 2 mg/l dans l'eau de boisson ne constituerait pas un danger pour la santé.

Bien qu'aucune valeur guide ne soit définie par l'OMS pour la qualité sanitaire de l'eau de boisson, il semblerait que le fer provoque une modification de l'aspect et du goût de l'eau qui est perceptible à partir de 0,3 mg/l. Par ailleurs, une forte turbidité de l'eau (due à la présence de fer colloïdal) peut favoriser la croissance des microorganismes.

Ce facteur s'avère donc a priori plus important à considérer, pour deux raisons.

D'abord parce que la transformation métabolique du fer dans les captages et à leur sortie, de sa forme réduite soluble à sa forme oxydée insoluble, qui occasionne sa précipitation plus ou moins

rapide, se fait sous l'action des bactéries du fer (bactéries capables de se développer en présence de fer et de l'oxyder), non pathogènes pour l'homme mais susceptibles de constituer un milieu favorable à une association avec des bactéries ou d'autres micro-organismes pathogènes.

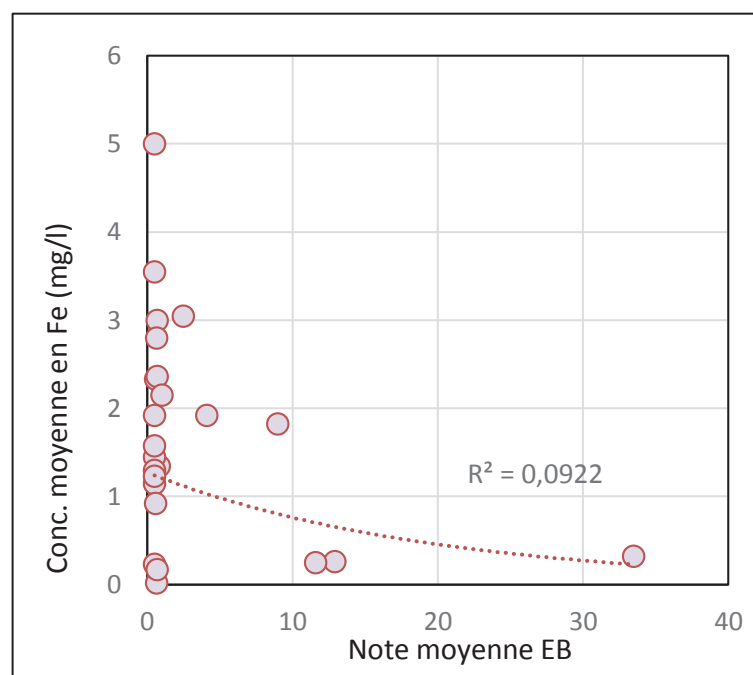
Ensuite parce que la présence de fer dissous en tête de forage à un niveau supérieur à une limite qui reste à préciser, mais que l'on peut fixer provisoirement à 2mg/l, nécessitera, à moyen terme, de mettre en place des unités adaptées de traitement du fer. Ce traitement peut a priori s'envisager à partir de différents procédés, allant de la simple exploitation du processus « aération → précipitation » à des traitements plus sophistiqués. Mais il pourra dans tous les cas être couplé à un traitement de potabilisation bactériologique. Il sera reparlé plus loin, dans la proposition de programme d'action, de la définition des priorités qui conduiront à envisager, pour un traitement coordonné du fer et des bactéries pathogènes dans l'eau de boisson, une première génération de captages urbains, à vocation dominante ou unique de production d'eau potable.

L'étude menée sur la qualité bactériologique était l'occasion d'approfondir les connaissances sur le fer et d'étudier l'éventuel lien entre ce dernier et la qualité microbienne. Ainsi, 202 mesures de fer ont été réalisées sur les eaux des forages et sur différents points des réseaux de distribution. Le tableau suivant présente la répartition des mesures de fer par campagne et par site :

Tableau IV.C.1 : Répartition des mesures de fer effectuées au cours de l'étude

	Total	Campagne 1	Campagne 2	Campagne 3	Campagne 4
Nombre de mesures réalisées	202	55	48	47	52
Sortie forage	96	21	23	26	26
Sortie château d'eau	78	21	18	18	21
Réseau de distribution	25	10	7	3	5

Figure IV.C.7 : Relation entre la concentration en fer et la note de contamination des eaux brutes



La figure ci-contre permet de visualiser les 26 couples de valeurs disponibles. Pour nous affranchir des variations de la concentration en Fer d'une campagne à l'autre, dues essentiellement à la durée du pompage, nous n'avons figuré ici que la moyenne des 4 - ou parfois 3 - valeurs disponibles par point.

Il apparaît clairement qu'il n'existe pas de relation entre la concentration en fer et la contamination des eaux brutes. La concentration des 3 points correspondant aux plus fortes notes dans le domaine des faibles concentrations en fer est en effet largement compensée par le fait que les plus faibles notes (absence

de contamination) peuvent indifféremment correspondre à des eaux très chargées, comme à des eaux exemptes de fer.

IV.D. PARAMETRES LIES AUX FORAGES EUX-MEMES

Des relations ont été recherchées systématiquement entre la fréquence et la gravité des contaminations (représentées par le calcul de notes moyennes par site et par point de prélèvement) et un certain nombre de facteurs, même quand la probabilité de l'existence de relation est faible a priori, comme:

- La localisation des forages,
- Leur âge,
- Leur profondeur, ou plutôt celle des horizons crépinés (qui correspondent aux différents aquifères exploitables de la région)
- Leurs caractéristiques techniques (diamètres, nature des tubages et des crépines,...)

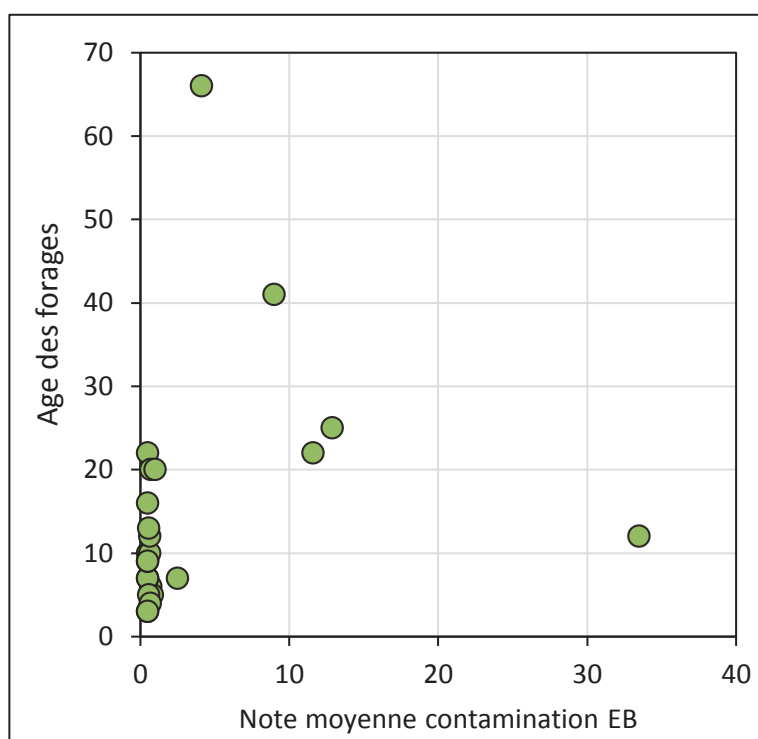
IV.D.1. Localisation des forages

Comme l'indiquent les cartes n°2 et n°3 ci-après, qui présentent les notes moyennes de contamination obtenues pour les 25 sites-tests, d'abord dans les eaux brutes, puis en sortie de réservoirs, la répartition des sites contaminés est totalement aléatoire au plan géographique, et il n'existe aucun regroupement dans des sous-régions particulières. On pourra également constater, en comparant les deux cartes, qu'il existe peu de cas de filiation entre la note eaux brutes et la note réservoirs (voir aussi paragraphe III.D.2.)

IV.D.2. Age des forages

Bien que l'on accorde a priori peu de chances qu'il puisse exister une éventuelle influence du vieillissement des ouvrages, on ne peut complètement écarter cette hypothèse. On a donc cherché une quelconque relation entre l'âge des forages et la contamination des eaux brutes (représentées par leur note moyenne).

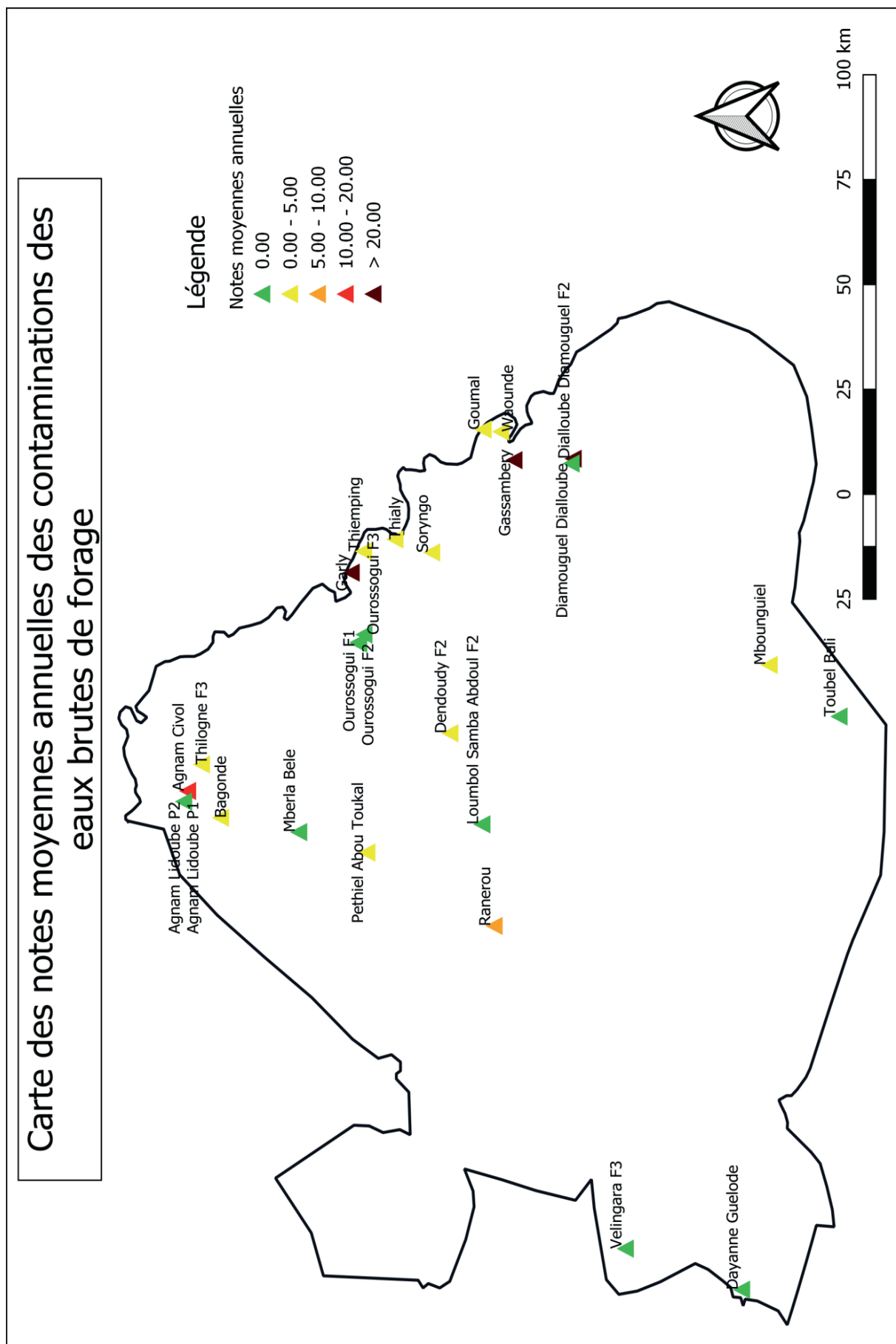
Figure IV.D.1 : Relation entre l'âge des forages et la note de contamination des eaux brutes



Le graphe fait apparaître :

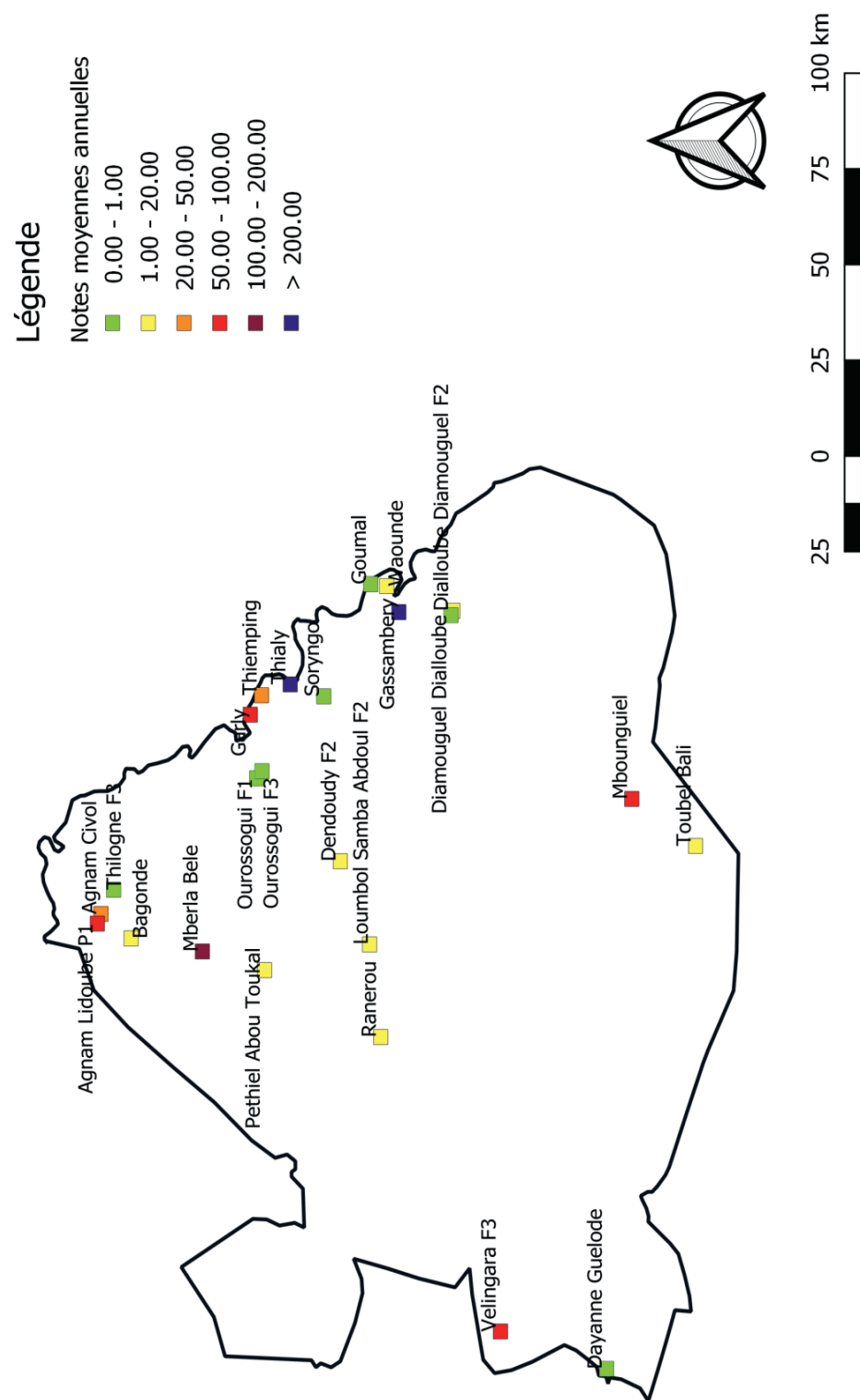
- que les eaux brutes les plus contaminées peuvent venir de forages assez récents (12 ans), comme de forages très anciens (66 ans),
- que les eaux brutes les moins contaminées peuvent venir de forages très récents (3 ans), comme anciens (22 ans),
- et qu'en conséquence il n'y a pas de corrélation entre ces deux facteurs.

Carte 2 : Notes moyennes annuelles des contaminations des eaux brutes de forage



Carte 3 : Notes moyennes annuelles des contaminations des eaux des réservoirs

Carte des notes moyennes annuelles des contaminations des eaux des réservoirs



IV.D.3. Aquifères et profondeur des horizons captés

Rappelons que, des quatre aquifères captés par les forages sélectionnés (nappe alluviale, Eocène, CT et Maastrichtien), les deux derniers, qui représentent au moins 22 sites sur 24, possèdent exactement la même lithologie (sables et grès quartzeux très purs avec parfois inclusions ferrugineuses). Deux éléments concourent à rendre impossible une contamination in situ de ces formations aquifères :

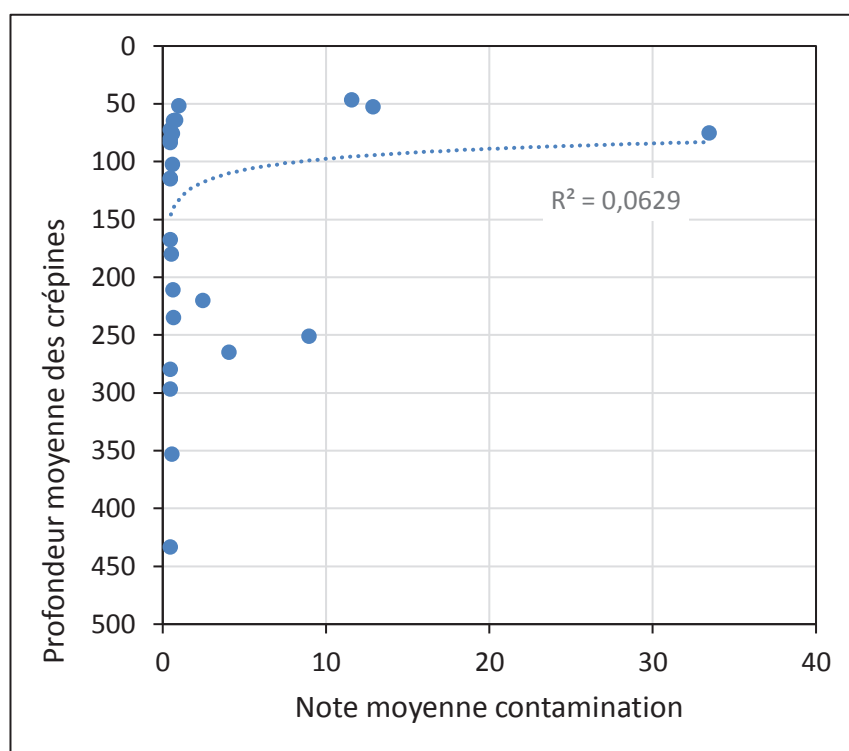
- L'absence de relations directes avec la surface, donc de possibilité d'infiltration d'eaux souillées,
- Le pouvoir de filtration et d'autoépuration considérable de ce type de formations.

L'Eocène n'est capté avec certitude que par les deux puits P1 et P2 d'Agnam Lidoube. On ne possède pas d'informations directes sur la lithologie des niveaux captés, mais s'agit probablement de calcaires gréseux durs, peut-être fissurés. A Gassambéry (le forage le plus court de l'échantillon, avec un toit des crépines calé à seulement -38m), la très faible salinité de l'eau semble indiquer qu'il s'agirait plutôt, soit de la nappe alluviale, soit du CT.

Dans ces cas, même avec un pouvoir d'autoépuration des alluvions élevé, on ne peut pas écarter à 100% une contamination depuis la surface. Celle-ci pourrait se produire par cheminement d'infiltrations le long du cuvelage insuffisamment protégé en tête (à Agnam Lidoube) ou du tubage de tête (à Gassambéry), suite à l'absence ou à la détérioration de la cimentation de tête (conséquence des opérations d'air-lift à fort débit ?)

Dans tous les cas, l'aquifère ne saurait constituer une variable explicative des contaminations, qui affectent indifféremment les quatre aquifères captés. Pour vérifier cette absence présumée de relation, la meilleure variable à corrélérer avec le niveau de salubrité de l'eau (que l'on choisit de caractériser par la note moyenne sur les eaux brutes de chaque ouvrage) est la profondeur du captage ; celle-ci peut être représentée par la profondeur moyenne des crépines de chaque forage.

Figure IV.D.2 : Relation entre la profondeur des crépines et la note de contamination des eaux brutes



Ce graphique confirme qu'il n'existe aucune corrélation digne de ce nom.

Dans le détail, on peut noter :

- que les eaux brutes les plus contaminées peuvent venir de forages peu profonds (47, 53, 76m), comme de forages profonds (250, 265 m)
- que les eaux brutes les moins contaminées peuvent venir de forages indifféremment peu profonds (50 m), ou très profonds (430 m)

et qu'en conséquence, il n'y a pas de corrélation entre la profondeur des forages et la contamination.

IV.D.4. Caractéristiques techniques (diamètre, nature des tubages, des crépines...)

Ces paramètres (diamètres des chambres de pompage, des tubes d'extension, des crépines, types de crépines, matériaux d'équipement (acier noir ou inox, PVC), n'ont aucune probabilité d'interférence avec le niveau de contamination des eaux brutes.

IV.E. PARAMETRES LIES A L'ENVIRONNEMENT PROCHE DES FORAGES

IV.E.1. Propreté et environnement des installations

L'inventaire des captages DRH / ADOS avait montré que l'état de la propreté des cabines de pompage recouvrant les têtes de forage et les dispositifs d'exhaure (soupapes, prises manométriques, vannes, compteurs, etc....) était très variable – certaines étant souvent anormalement sales pour des installations de production d'eau potable. De façon relativement fréquente, la saleté des locaux, et notamment le stockage de bidons de gasoil, de batteries, les projections d'huile des groupes, peut ainsi faire craindre des pollutions chimiques, et a fortiori bactériologiques. Le choix des captages destinés à établir ce diagnostic, même si l'on n'a pas cherché à y inclure systématiquement des cas à première vue problématiques reflète cette variabilité.

Il inclut ainsi :

- Plusieurs cas d'installations de tête très bien tenues (Agnam Civol, Dayanne Guelode, Gassambéry, Mberla Bele, ...)
- Deux forages solaires (Garly, Thialy), représentatifs des ouvrages du PRS II, dont les têtes, situées en plein air, sont systématiquement protégées par des plaques soudées, avec un orifice de mesure des niveaux protégé par un bouchon vissé (malheureusement généralement inaccessible aux mesures). Ces forages, dans lesquels les seules manipulations (rares) sont effectuées par une entreprise spécialisée, étaient considérés a priori comme les mieux protégés de tout le parc.
- Un cas de cabine de pompage bien tenue, mais sur les murs de laquelle des proliférations de punaises ont été constatées (Soryngo),
- Un cas de pompe à axe vertical dans un local bien tenu (Thiemping)
- Plusieurs cas de forages situés à l'extérieur des cabines de pompage, non protégés (Ourosogui F1, Velingara F3), ou avec des petites constructions type regard, propres ou sales (Thilogne F3)
- Plusieurs cas d'installations chroniquement sales (Velingara, Thilogne, Ranérou)

En fait, de façon assez surprenante, les résultats obtenus semblent montrer une absence de relation entre la propreté des installations et les cas de contamination des eaux brutes. C'est ainsi que certains sites propres, voire très propres, peuvent produire des eaux brutes contaminées (Gassambéry, Agnam Civol, forages solaires) quand d'autres, sales, produisent des eaux d'excellente qualité (Velingara).

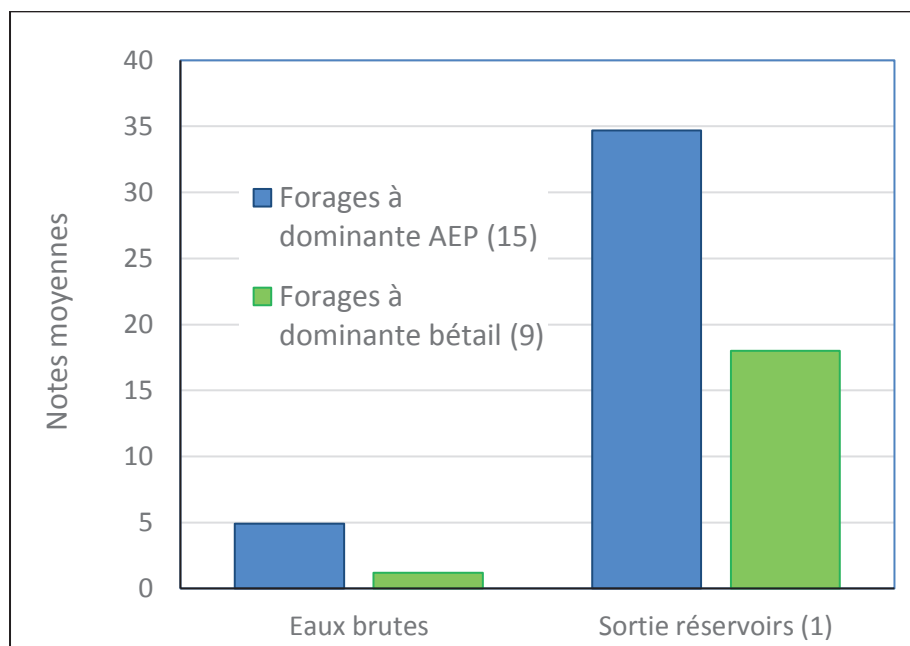
Par contre, à Soryngo, la faible contamination de l'eau brute notée lors de la première campagne pourrait bien résulter de la contamination du tubage et de la tranche d'eau supérieure par des centaines de cadavres de punaises (remontées à la surface par la sonde électrique lors des mesures).

IV.E.2. Fréquentation des troupeaux

Un autre facteur susceptible d'intervenir est la destination de l'eau extraite. Certains forages ne produisent que de l'eau potable (Ourosogui F1, F2, F3, Loumbol S.A.), d'autres ont pour vocation principale l'alimentation des troupeaux, qui peut représenter dans certains cas jusqu'à 90% de leur production.

Dans le cas de ces forages pastoraux, souvent très exploités et pour certains surexploités, les troupeaux s'approchent très près des forages et des réservoirs, surtout des réservoirs au sol quand il en subsiste. Il en résulte des borbiers dont on peut penser qu'ils constituent une forte menace sur la qualité des eaux, même des eaux brutes.

Figure IV.E.1 : Notes moyennes de contamination en fonction de l'utilisation des eaux



(1) Hors réservoirs au sol

En fait, l'analyse des notes moyennes des deux catégories de forages, ceux à dominante de production d'eau potable, et ceux à dominante de production d'eau animale, montre une évolution inverse de celle attendue, c'est-à-dire une diminution des notes pour les sites à forte fréquentation du bétail, au niveau des eaux brutes comme à celui de la sortie des réservoirs.

On en déduira que la fréquentation des troupeaux à proximité immédiate des captages n'a pas d'incidence sur la qualité bactériologique des eaux. Ceci constitue, en d'autres termes, une confirmation de l'absence générale de relations entre les couches captées, quelles que soit leur profondeur, et la surface du sol⁵.

IV.E.3. Cas particulier des puits équipés

Par contre, dans le cas particulier des puits équipés, qui captent par définition des nappes phréatiques beaucoup plus superficielles, le seul exemple testé dans cette étude indique que le pompage motorisé, la protection par un couvercle, et la clôture d'un petit périmètre de protection sont de nature à diviser la contamination d'un facteur 50 par rapport aux puits non équipés.

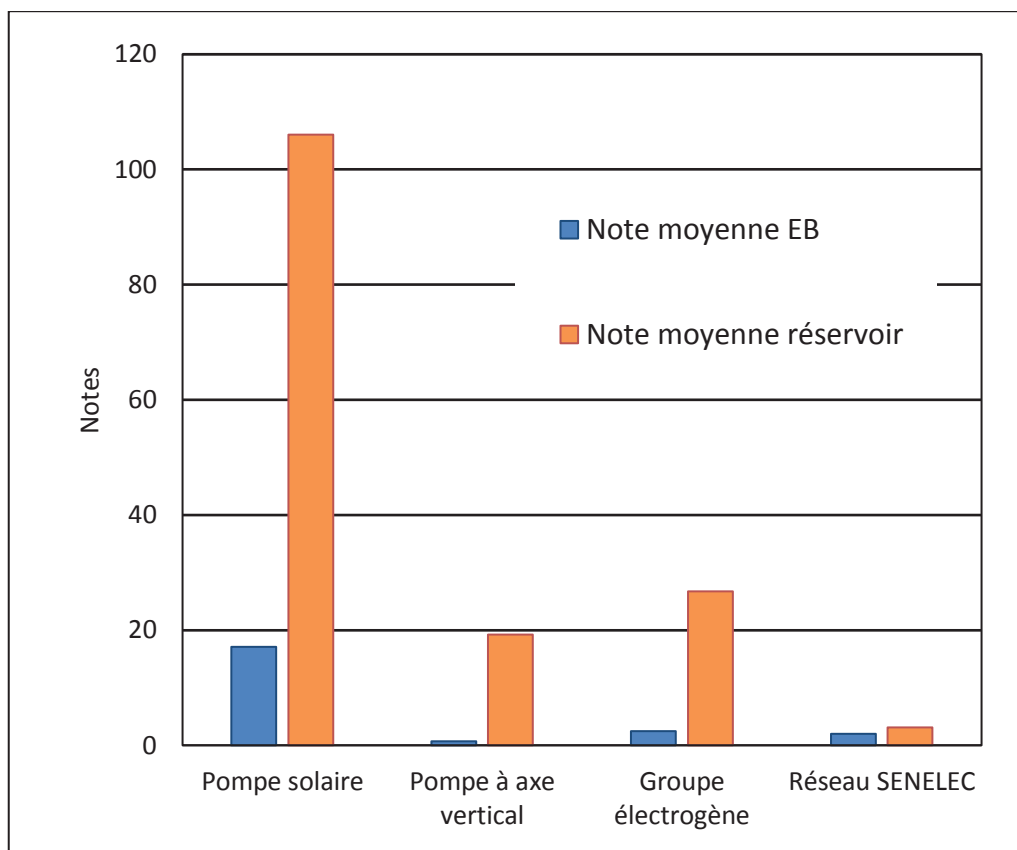
⁵ Il ne s'agit pas bien sûr d'énoncer ici une règle universelle, valable pour toutes les profondeurs ni pour tous les types d'aquifères et de terrains de couverture, mais d'une règle valable pour la région de Matam et au moins la quasi-totalité des aquifères qui y sont captés pour la production publique d'eau potable (et, comme toutes les règles, susceptible d'exceptions).

IV.F. PARAMETRES LIES AU POMPAGE ET AU REFOULEMENT

IV.F.1. Pompe et énergie

La figure ci-dessous présente les notes moyennes (eaux brutes et sortie de réservoir) correspondant aux quatre différents types de pompes (dont en fait 3 types de pompes immergées classées selon leur approvisionnement énergétique, et un type de pompe mécanique alimenté par un moteur diesel en surface : pompe à axe vertical).

Figure IV.F.1 : Notes moyennes de contamination des eaux brutes et des eaux en sortie de réservoir selon le type de pompe



Il apparaît qu'au niveau des eaux brutes comme en sortie de réservoir, les plus fortes notes de contamination correspondent aux deux cas de pompes solaires.

Ce résultat, est au premier abord surprenant puisque, comme nous l'avons vu, les têtes de puits du programme CILS II sont beaucoup mieux protégées que celles des autres forages.

Il convient donc de l'approfondir.

➤ Pompes solaires (2 cas):

- au niveau des eaux brutes, la première pompe est contaminée une seule fois, mais gravement (campagne 2), la seconde ne l'est jamais ;
- au niveau des réservoirs, le premier est contaminé (gravement) en campagne C2, légèrement à moyennement les 3 autres campagnes, tandis que le second l'est gravement pour les 4 campagnes;
- ces contaminations confèrent au premier de ces ouvrages la plus mauvaise note au niveau des eaux brutes (Garly, 33), au second, la deuxième plus mauvaise au niveau des réservoirs (Thialy, 165);

Dans la mesure où il ne peut y avoir, en toute logique, une influence directe des pompes, ni de contamination des têtes de forages, la contamination des installations solaires ne peut provenir que des réservoirs. Le problème doit alors découler, de façon quasi-certaine, du surdimensionnement de

ceux-ci (occasionnant des temps de séjour trop long), ce niveau élevé de contamination pouvant alors se propager exceptionnellement en retour dans les EB. Cependant, Il est clair en tous cas que ces conclusions devront être confirmées et précisées.

➤ **Pompes à axe vertical (1 seul cas):**

Le forage de Thiemping est représentatif des quelques PAV encore en fonctionnement dans la région, qui offrent rappelés-le les plus fortes longévités des différents types de pompes, mais sont progressivement remplacées par des pompes immergées. Cette pompe génère une petite fuite d'huile, mais le conducteur veille à maîtriser celle-ci, tout en maintenant un bon niveau de propreté dans le local. Malgré cela, les eaux brutes du forage ont été légèrement contaminées une fois (C3), et le réservoir 2 fois (C2, C3), dont une assez sérieusement.

➤ **Pompes immergées:**

Le type d'alimentation électrique des pompes immergées n'intervient logiquement pas dans la qualité des eaux brutes, ni d'ailleurs probablement dans celle des réservoirs.

IV.F.2. Colonnes de refoulement

Lors des visites de l'inventaire, il a été diagnostiqué que plusieurs forages étaient affectés de fuites dans les colonnes de refoulement, à des profondeurs variables entre le niveau dynamique et la surface du sol. Ces fuites proviennent généralement de corrosions électrolytiques, qui se développent aux points de contact entre des matériaux métalliques de natures différentes⁶.

Au moins un des forages sélectionnés (Dendoudy F2) a été signalé en février 2017 comme affecté de ce type de problème, qui se traduit d'une part par une chute d'eau en pluie et son ruissellement dans le tubage entre les orifices percés dans la colonne (vers -29m) et le niveau dynamique (vers -60m), d'autre part par la vidange de la colonne d'eau entre son débouché dans le château d'eau (+25m) et la cote des fuites (-29m) à chaque arrêt de la pompe. Signalons au passage que l'érosion rapide par l'eau sous-pression de tels orifices se traduit inévitablement, après quelques mois, par la chute de la pompe, et parfois la perte de l'ouvrage.

Des entérocoques ont été mesurés dans les eaux brutes du forage en question lors des campagnes 1 et 2, lui conférant une note EB de 2,6, qui se transforme ensuite dans le réservoir en 6,0 avec l'apparition d'*E. Coli*. Les deux campagnes suivantes donnent ensuite des résultats négatifs, ce qui pourrait signifier que les fuites ont été réparées entre novembre 2017 et mars 2018. Mais on sait par ailleurs que ce forage a connu des pannes et que le conducteur a eu recours aux anciens forages pour poursuivre l'alimentation en eau, cela pourrait aussi expliquer les résultats. Ce type d'aléas complexifie encore la compréhension des phénomènes de contamination. Il est hautement probable que ces contaminations soient dues à ces fuites.

IV.F.3. Clapets anti-retour

Il est relativement fréquent que les clapets de pied qui doivent équiper systématiquement les pompes soient détériorés, en particulier dans les forages souffrant de venues de sable, voire absents.

Dans ce cas, on retrouve le même problème de vidange des colonnes de refoulement entre le haut du château d'eau et le niveau dynamique à chaque arrêt de la pompe, avec les risques qui en découlent (au niveau de la qualité bactériologique et de la précipitation des oxydes de fer).

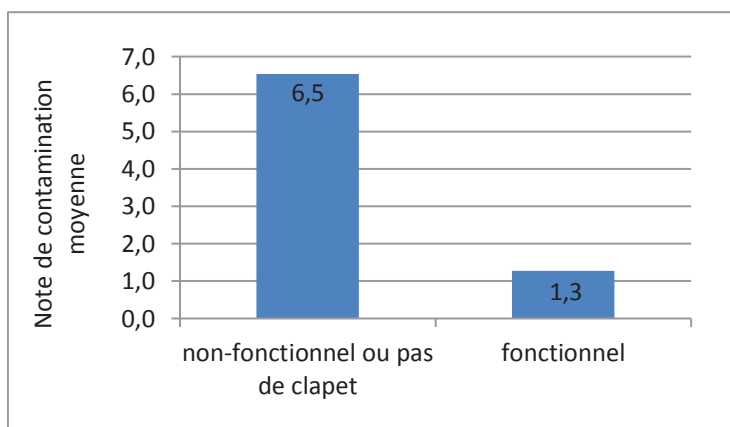
Au moins un des forages sélectionnés (Ranérou) a été signalé en 2017 comme souffrant de ce problème, peut-être aggravé par de nombreuses fuites dans le local « de protection ». Il n'est donc pas surprenant que l'on y ait trouvé d'assez nombreux entérocoques dans les eaux brutes des trois

⁶ Ce peut être par exemple des points de soudure de pattes métalliques destinées à éviter le dévissage de tubes manchonnés, effectués avec un acier différent de celui des tubes (et peut-être des baguettes de soudure non conformes), comme c'est le cas sur le forage de Thiehel Sebe, entre -15 et -20m (observation de juin 2018 dans le cadre d'une visite au projet SEAUEL).

premières campagnes (note moyenne 4,1), devenant 6.6 dans le réservoir par augmentation des entérocoques et apparition d'*E. coli*.

L'état des clapets anti-retour est un paramètre qui a été suivi lors des campagnes de prélèvement, soit en questionnant le conducteur du forage sur sa connaissance des équipements soit en relevant des preuves de dysfonctionnement évident. On sait donc que sur les 6 forages ayant montré des contaminations moyennes (5) ou sérieuses (1), au moins trois d'entre eux ont des problèmes de clapet, et un a une fuite dans la colonne de refoulement.

Figure IV.F.2 : Note moyenne de contamination des eaux brutes en fonction de l'état du clapet anti-retour



La note moyenne de contamination des eaux brutes des forages possédant un clapet fonctionnel est nettement inférieure à celle des forages ne possédant pas de clapet ou ayant des dysfonctionnements. On démontre ainsi que la présence et le bon fonctionnement des clapets anti-retour sont donc des éléments qui peuvent influencer la qualité bactériologique des eaux de forage.

IV.G. PARAMETRES LIES AU SEJOUR DANS LES RESERVOIRS

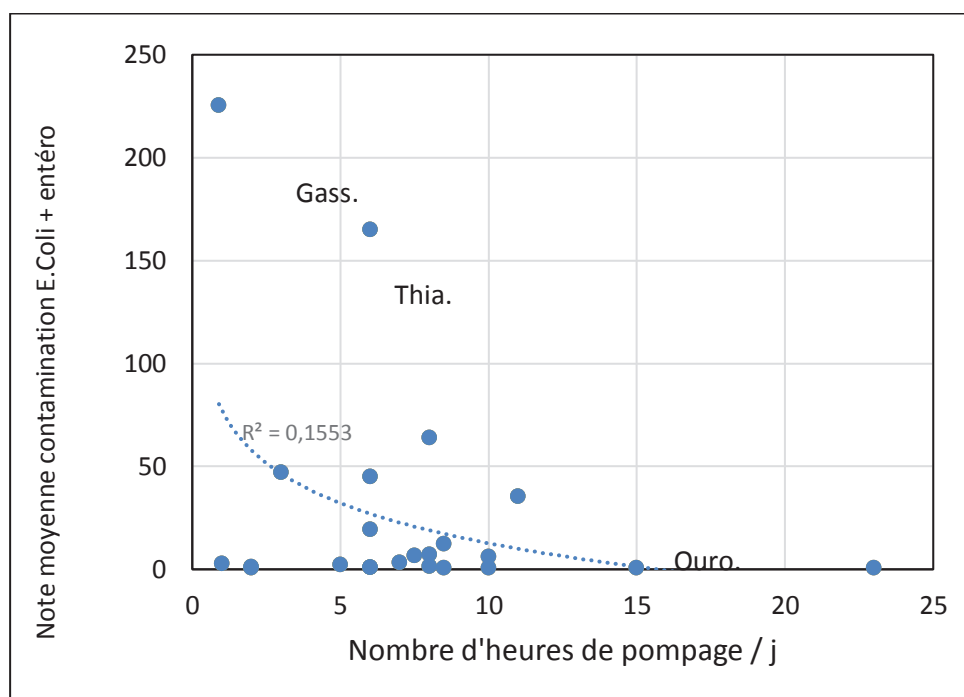
Il a été vu aux paragraphes III.D.1et III.D.2 que, si la contamination des réservoirs pouvait provenir des eaux brutes dans quelques rares cas, elle naissait dans ceux-ci dans leur grande majorité. En outre, il est quasiment certain que dans un bon nombre de cas, ce soient les réservoirs qui contaminent les eaux brutes, et non l'inverse.

D'où peut alors provenir cette contamination des réservoirs ? Les facteurs les plus marquants sont :

- la fréquentation des réservoirs par des animaux (oiseaux), permise par de petites dégradations (couvercles des trappes d'accès manquants, arrachage des grillages protecteurs...),
- les défauts d'entretien périodique (fréquence, modes opératoires) : il n'a pas été possible de mettre en évidence une relation claire entre la fréquence des nettoyages et le niveau de contamination, mais il semble logique qu'il en existe une,
- et surtout, le **taux d'utilisation des équipements** ; on constate en effet que la capacité des forages (représentée par leur débit équipé et le volume du ou des réservoirs) est finalement, fréquemment, peu sollicitée, soit en période d'hivernage, soit même au long de l'année.

Ce taux d'utilisation peut être représenté par plusieurs paramètres, dont les plus représentatifs s'avèrent être les durées journalières de pompage et le temps de séjour de l'eau dans les réservoirs (temps de séjour = volume utile du réservoir / production moyenne). Cependant, les recherches de corrélations mathématiques entre ces facteurs « taux d'utilisation » et les notes représentant les contaminations restent peu, voire non significatives, essentiellement parce que l'on ne dispose que de peu d'informations sur l'exploitation des forages, et notamment sur leur exploitation en période d'hivernage.

Figure IV.G.1 : Note moyenne de contamination en fonction du nombre d'heures de pompage moyen annuel



Les taux d'utilisation moyens annuels communiqués par les ASUFOR ne rendent par exemple pas du tout compte de ce que certains ouvrages restent inutilisés plusieurs jours consécutifs. Nous fournissons ci-après deux graphiques exploitant les temps de séjour.

Figure IV.G.2 : Note moyenne de contamination en fonction du temps de séjour moyen annuel

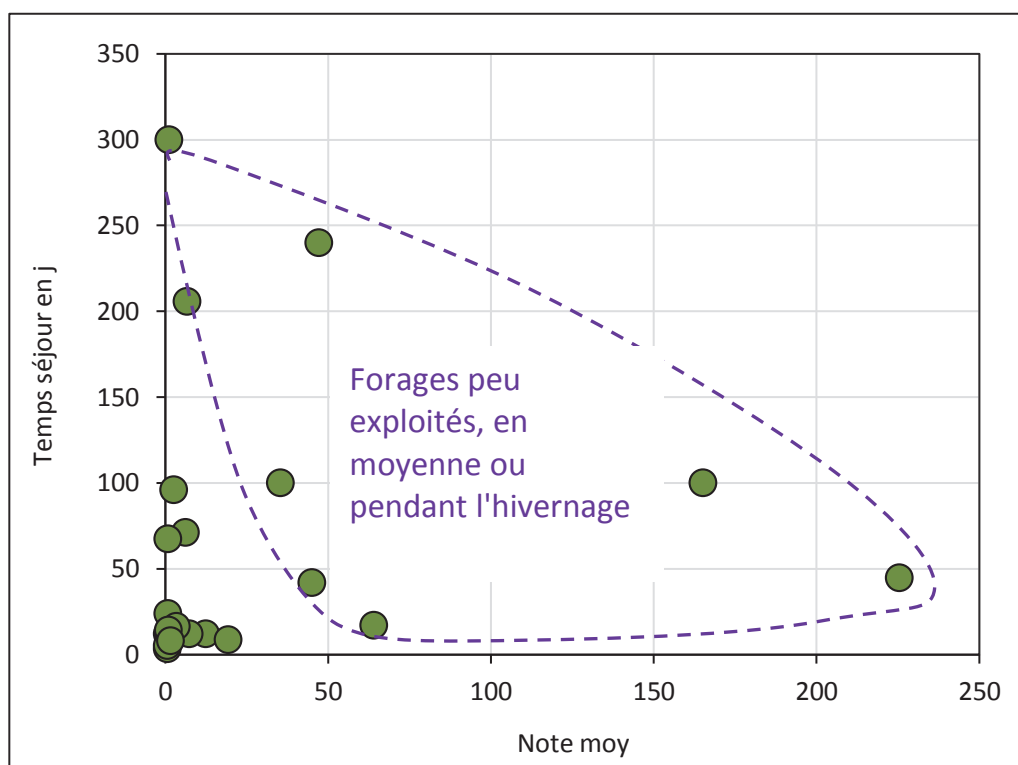
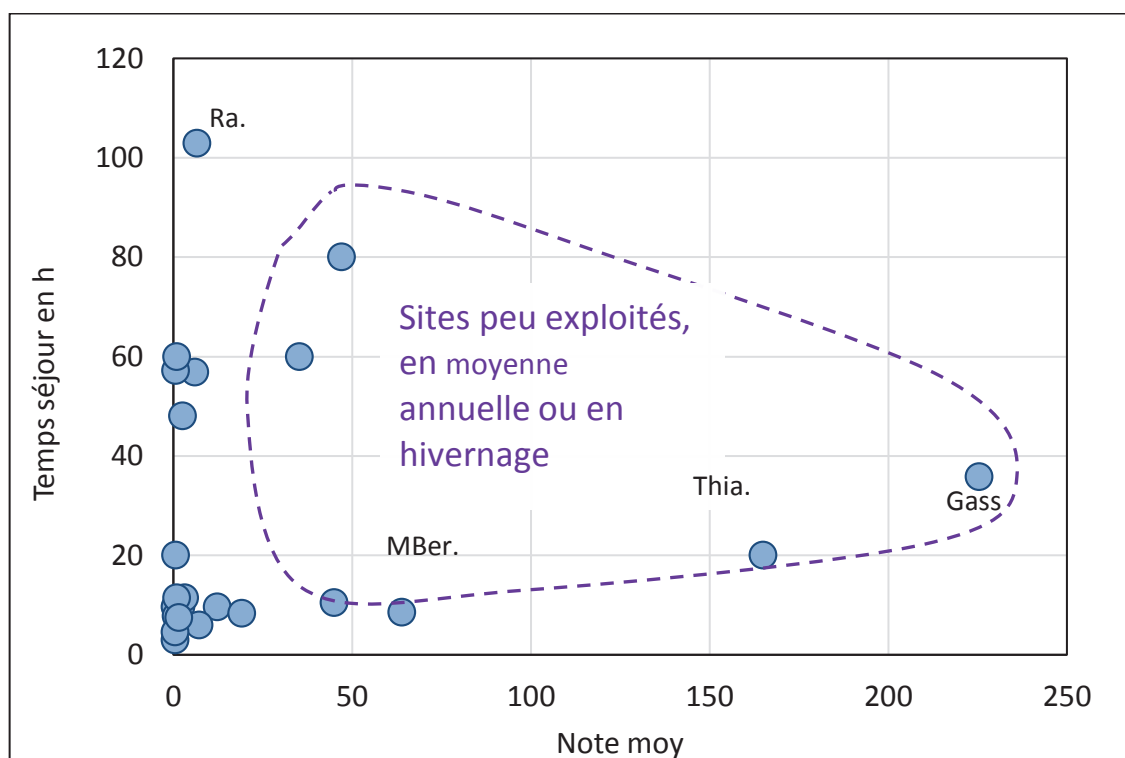


Figure IV.G.3 : Note moyenne de contamination en fonction du temps de séjour pendant l'hivernage



L'examen de ces graphiques permet de constater que, même si la caractérisation de l'influence de ces facteurs taux d'utilisation est peu probante sur le plan purement mathématique, il reste un constat fondamental :

- Les forages les plus utilisés sont les moins contaminés,
- Tandis que les plus contaminés correspondent aux moins utilisés.

Ce constat essentiel sera repris ci-après comme clé principale de définition d'un profil-type («portrait-robot») des sites les plus vulnérables à la contamination.

IV.H. PARAMETRES LIES AU TRANSIT DANS LES RESEAUX

On a vu au paragraphe III.C que les contaminations avaient tendance à diminuer dans les réseaux de distribution. Cette diminution, qui paraît à priori surprenante, peut en fait s'expliquer par la capacité de survie et de développement des bactéries dans le milieu extérieur. En effet, les bactéries pathogènes qui ont été recherchées dans le cadre de cette étude (*E. coli* et entérocoque) sont des bactéries intestinales. Les conditions du milieu extérieur ne leur permettent pas de se développer de la même manière que dans les intestins des animaux et des hommes, elles peuvent en revanche survivre plusieurs jours dans l'eau. Ainsi, une contamination se produisant au niveau du réservoir peut s'atténuer au cours du réseau de distribution, si le temps de séjour dans celui-ci est suffisamment long.

Ces contaminations affectant les réseaux de distribution peuvent alors avoir différentes origines :

- D'abord, il semble logique que lorsqu'un réservoir se trouve contaminé, cette contamination se propage dans les réseaux qu'il alimente.
- Ensuite, les **fuites** et les **canalisations endommagées** constituent une nouvelle porte d'entrée pour les bactéries. Cela est d'autant plus vrai que certains réseaux connaissent des défauts d'alimentation, dus à des pannes ou à un fonctionnement intermittent des forages (c'est notamment le cas des forages fonctionnant avec un groupe électrogène, ceux-ci sont généralement allumés le matin et le soir, et des coupures d'eau peuvent alors survenir en

journée), entraînant des baisses de pression dans les réseaux et favorisant ainsi l'entrée des contaminations.

- La présence de **biofilm** (ensemble de micro-organismes fixés à une surface) dans les canalisations peut aussi abriter des communautés de micro-organismes pathogènes et entraîner ainsi une contamination récurrente de l'eau potable.
- Le **manque d'entretien** des canalisations est enfin un facteur aggravant de contamination. En effet, une purge et une désinfection régulière des réseaux permet d'éliminer l'eau stagnante, les biofilms et les matières en suspension.

Rappelons toutefois que peu de données sont disponibles sur la conception et la gestion des réseaux. Les phases de prélèvement dans le cadre de cette étude étaient trop contraignantes pour approfondir les connaissances mais il serait intéressant de mener des investigations complémentaires pour mieux comprendre l'origine des contaminations et mieux les gérer.

IV.1. L'EXEMPLE DES FORAGES DU PHAR

Les forages du programme PHAR, malgré leur jeunesse et le suivi dont ils ont pu bénéficier, n'échappent pas aux contaminations, puisque 3 d'entre eux sur 7 ont connu de sérieuses contaminations de leurs réservoirs (dont une serait chronique d'après notre classification, et aurait concerné au moins une fois les eaux brutes). Les autres cas de contamination, légers, seraient accidentels.

D'où l'intérêt de rassembler leurs résultats sur le tableau ci-après, en les assortissant de commentaires qui permettent de souligner à nouveau l'importance du surdimensionnement de leurs équipements par rapport à leur taux d'exploitation, dans les conditions actuelles.

Tableau IV.I.1 : Résultats des forages du PHAR

	Note moyenne contamination		Profondeur moyenne des crépines (en m)	Durée de pompage (en h)			Commentaires
	Sortie forages	Sortie réservoirs		étiage	hivernage	moyenne	
Bagonde	0,7	2,1	235	5	4	5	Contamination accidentelle du forage en C1 (entéro) ; faible contamination systématique du réservoir
Pethiel Abou Toukal	0,67	3,3	211	12	5	7	Faible contamination EB en C2; contamination accidentelle modérée du réservoir (puis forte sur le réseau) en C2
Mbonguïel	0,58	45,0	353	15	1,5	6	Forte contamination accidentelle du réservoir en C3
Mberla Bele	0,5	63,9	168	16	4	8	Forte contamination du réservoir en C1 (+contamination légère en C2 et C4)
Gassambéry	11,6	225,4	47	1,1	0,7	0,9	Pompe surdimensionnée, tourne très peu ; très forte contamination chronique du réservoir; contamination notable des EB en retour en C3 et C4
Goumal	0,83	0,6	65	2,6	0,7	2	Contre-exemple: pas de contamination chronique du réservoir malgré faible taux d'utilisation; faible contamination accidentelle EB en C4 (entéro); contamination accidentelle du réseau en C3
Toubel Bali	0,5	1,0	433	4	0,5	2	Idem : pas de contamination notable du réservoir malgré faible taux d'utilisation; faibles contamination réservoir et réseau en C3

IV.J. SYNTHÈSE DES FACTEURS DE CONTAMINATION

Cette synthèse fait l'objet du tableau ci-après. Les différents facteurs y sont classés par ordre d'influence sur la qualité bactériologique des eaux.

Tableau IV.J.1 : Synthèse des facteurs de contamination

	Pas d'influence	Influence occasionnelle	Influence notable	Influence déterminante
Forages eux-mêmes	Localisation			
	Age			
	Profondeur et aquifère			
	Caractéristiques techniques	Cimentation colonne de tête		
	Salinité des eaux			
	Température des eaux			
	Concentration en fer			
		Protection des têtes de forages		
Environnement proche des forages	Propreté des locaux, fuites en surface			
		Prolifération d'insectes		
	Proximité du bétail, borbiers			
Equipements de pompage et d'exhaure	Type de pompe, énergie	Pompe à axe vertical		
			Fuites dans les colonnes de refoulement	
			Clapets anti-retour	
Réservoirs				Taux d'utilisation des équipements
			Dégradations ou défauts d'entretien	
			Nettoyage des châteaux d'eau	
				Siphons et manipulations dans les réservoirs au sol
Réseaux		Fuites et canalisations endommagées, présence de biofilm		

V. EXPLOITATION DES RESULTATS

V.A. EXTRAPOLATION A L'ENSEMBLE DU PARC DES FORAGES A VOCATION DE PRODUCTION D'EAU POTABLE DE LA REGION DE MATAM

V.A.1. Représentativité

L'extrapolation des résultats obtenus à l'ensemble de la région de Matam ne peut s'effectuer, c'est évident, que d'une façon très prudente, et bien entendu provisoire. Cependant, il rentre bien dans les objectifs de l'étude un premier diagnostic sur la qualité bactériologique de l'eau à l'échelle de la région.

L'échantillon témoin sur lequel portent nos analyses représente, comme on l'a vu au chapitre II, 24 forages sur un total de 182 dédiés à la production d'eau potable et inventoriés dans le cadre de « l'Etat des Lieux » DRH / ADOS de décembre 2015. La représentativité de cet échantillon est évidemment relative (13% du total, qui s'accroît de 5 à 10 unités par an), mais loin d'être négligeable, d'autant que les sites ont été choisis pour couvrir tout l'éventail des localisations, des équipements, etc....

S'y ajoutaient au départ deux puits équipés utilisés pour la production d'AEP, dont seul l'un (Agnam Lidoube P1) a fait l'objet de mesures régulières, l'autre (Agnam Lidoube P2) ayant été déséquipé au profit d'un petit forage. Ce dernier a fait également l'objet d'un suivi sur deux campagnes, mais ses résultats (absence de contamination) n'ont pas été intégrés à la synthèse par manque de représentativité. Nous n'avons que peu d'informations concernant d'autres puits, ou forages privés, utilisés pour l'AEP, et n'avons donc pas fait porter l'effort sur ce type d'ouvrages, peu répandu et alimentant une faible population.

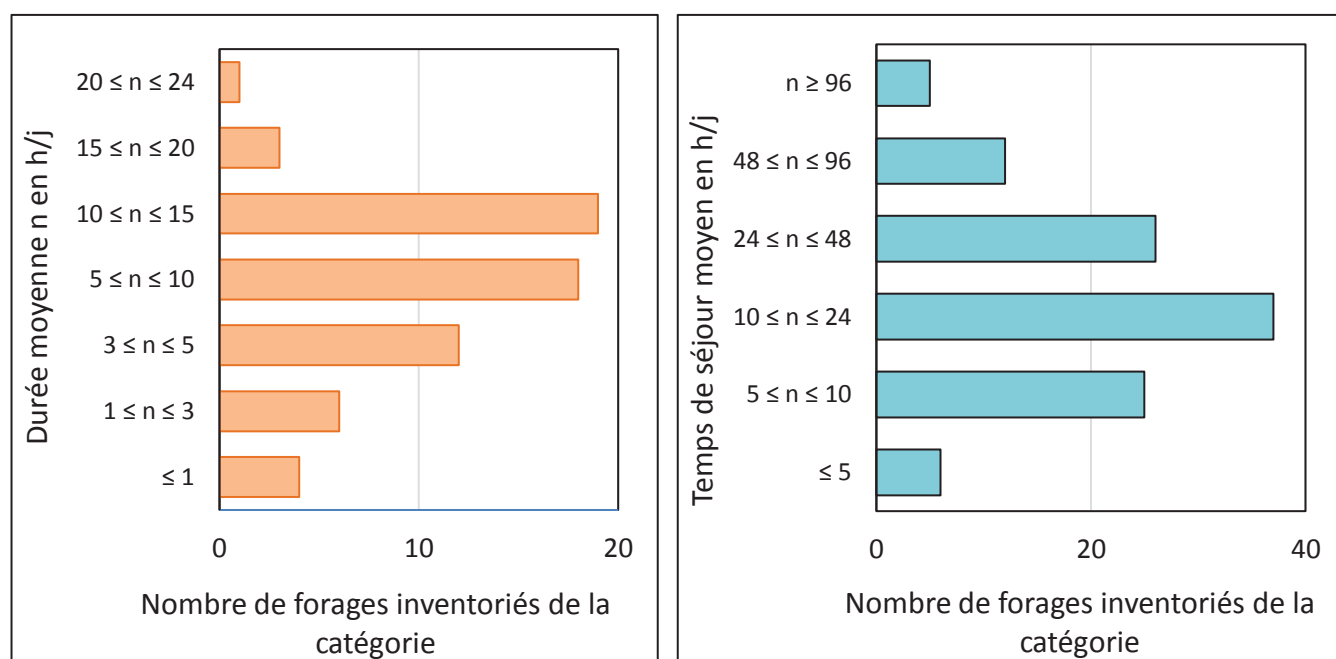
Enfin, pour ce qui concerne les puits non équipés et les points de prélèvement d'eaux superficielles, il est évident que leur nombre est très faible devant le nombre de puits existants, qui est de plusieurs centaines et encore plus devant celui des points de prélèvement d'eaux superficielles en période d'hivernage. Cependant, la totale cohérence des résultats obtenus, même en petit nombre, est à elle seule un excellent indice de leur représentativité.

V.A.2. Typologie des contaminations (« portrait-robot » des sites les plus vulnérables)

Pour revenir aux forages, il convient maintenant d'en établir une classification, afin de voir dans quelle mesure nos résultats pourraient être étendus, avec les précautions d'usage, à l'ensemble des forages de même catégorie. Pour cela, on pourrait déjà établir un ou des portraits-robots des sites les plus vulnérables à la contamination, basés au minimum sur l'un des paramètres dont l'analyse a fait l'objet du chapitre IV, et souvent sur le cumul de plusieurs d'entre eux.

Le premier indice est sans nul doute le taux d'utilisation de l'équipement en place par rapport à la capacité utile de stockage. Comme on l'a vu au paragraphe IV.G, il peut être représenté par plusieurs paramètres, dont les plus parlants seraient le nombre moyen d'heures de pompage/j, ou le temps de séjour moyen (= volume des réservoirs / production journalière moyenne). Comment l'ensemble des forages de la région se répartissent-ils vis-à-vis de ces deux paramètres ?

Tableau V.A.1 : Classement des forages inventoriés selon la durée moyenne des pompages (gauche) et les temps de séjour moyens (droite)



Comme l'indique le graph de gauche, sur l'ensemble des 63 forages renseignés (sur un total de 184 forages équipés), 4 tournent en moyenne moins d'une heure par jour, 6 moins de 3h et 23 moins de 5h. On notera que, parmi les forages mesurés, les trois dont les EB sont les plus contaminées se situent dans la catégorie moins de 3h/j. A l'opposé, seulement 4 forages tournent plus de 15 h/j, dont 3 étaient inclus dans notre sélection, et n'ont jamais présenté de contamination.

On arrive avec les temps de séjour moyen (graph de droite) à une analyse concordante, un peu mieux établie puisque portant sur 111 ouvrages renseignés. On retrouve dans les 5 forages dont le temps de séjour dépasse les 96h et dans les 12 qui dépassent 48h l'essentiel des forages les plus contaminés, tandis que l'essentiel des forages non contaminés présente des temps de séjour inférieurs à 10h.

En fait, ces deux critères seraient beaucoup plus parlants s'ils portaient, au lieu de la moyenne annuelle, sur la période d'hivernage, puisque certains forages conservent une moyenne annuelle élevée même s'ils sont très peu utilisés à l'hivernage. Mais les données (heures de pompage, ou volume pompé) nous ont été rarement fournies.

En outre, bien que déterminants, ces critères ne sont pas absolus. Il existe des exceptions, comme par exemple le forage de Toubel Bali. Très peu utilisé (2h/j en moyenne, quelques h/mois à l'hivernage), il n'a présenté aucun indice de contamination lors des 3 campagnes qui ont suivi l'hivernage.

En conclusion, on pourrait estimer grossièrement, sur la base de notre échantillon de 24 forages, que 25 à 35% des forages utilisés (soit 50 à 70 ouvrages en 2018) pourraient relever de cette catégorie.

Par ailleurs, le cas des 33 forages solaires (18% des forages équipés) inventoriés est à considérer comme pouvant également relever de cette catégorie à trop faible taux d'utilisation. La durée du pompage ne constituant pas dans ce cas une variable représentative (car généralement, le pompage étant automatisé, la pompe s'arrête automatiquement une fois le réservoir plein, pour ne reprendre que quand il sera vide, parfois après plusieurs jours), on ne peut que s'en remettre aux temps de séjour. Encore ceux-ci sont-ils fréquemment calculés sur la base de la production théorique journalière des pompes solaires, qui varie évidemment avec l'heure. Les mesures de débit ponctuelles pratiquées lors de nos passages ne nous aident alors guère. On note cependant que cette production théorique varie de 30 à 90 m³/j, et que le volume des châteaux d'eau, plus ou moins ajusté en conséquence, varie quant à lui de 30 à 75 m³ (avec cependant un CE de 100 m³ et 2 autres

de 150m³). Ceci nous conduit à estimer grossièrement qu'au moins 50% de ces installations solaires auraient des temps de séjour moyens trop élevés, supérieurs à 48h.

Mais il est évident qu'une approche plus précise des sites réellement vulnérables nécessitera des vérifications des mesures plus précises de production des pompes et des vérifications conditions d'asservissement des pompes.

Un **deuxième indice** est la présence de fuites dans les colonnes de refoulement ou de dysfonctionnement des clapets anti-retour. Le nombre de forages concernés est difficile à évaluer, parce qu'ils ne nous ont pas été systématiquement signalés lors de l'inventaire, et que la DRH procède fréquemment à des réparations ou remplacement de matériel, mais on peut estimer intuitivement qu'il pourrait être de l'ordre de 5% des ouvrages, soit une petite dizaine.

Un **troisième indice** serait la propreté des tubages, des têtes de forage (et des locaux, cabanes ou regards qui les abritent). Même si peu de liens directs entre cette propreté et des contaminations ont pu être mis en évidence, il est quasiment certain que la saleté de certains sites ne peut que les rendre plus vulnérables. On adjoindra à ce critère la présence de pompes à axe vertical, si tout du moins les futures analyses confirment leur influence. On estimera le nombre de forages ainsi concernés sur l'ensemble du parc à au moins 10%, soit 15 à 20 ouvrages.

Enfin, le **quatrième indice** concernerait les réservoirs qui présentent des détériorations, permettant notamment la fréquentation des oiseaux. On lui adjoindra, même si l'on n'a pas non plus pu mettre en évidence de lien direct, tout ce qui a trait à la fréquence et à la bonne exécution des manœuvres de nettoyage des réservoirs. On estimera, toujours grossièrement, le nombre de sites concernés à 15 ouvrages supplémentaires. Et l'on rajoutera à ce nombre une proportion importante des 19 sites comportant des réservoirs au sol, avec au minimum les 10 qui sont exploités par siphonage.

En conclusion, sur un parc de forages équipés aux fins de production d'eau potable qui doit atteindre, à la fin 2018, environ 200 ouvrages, on peut estimer :

- qu'environ 50 à 70 ouvrages sont rendus vulnérables à des contaminations bactériologiques du seul fait du surdimensionnement de leurs équipements (ou de leur sous-emploi),
- que s'y ajoutent, pour les mêmes raisons, une vingtaine d'ouvrages d'une catégorie particulière, celle des forages solaires,
- qu'environ une dizaine d'ouvrages sont rendus vulnérables par des défauts de leur matériel de pompage (colonnes de refoulement et clapets des pompes)
- qu'environ 15 à 20 ouvrages sont rendus vulnérables par le manque de propreté de leurs installations de tête,
- et environ 15 sites concernés par le manque d'entretien des châteaux d'eau, et au moins 10 de la vingtaine qui comportent encore des réservoirs au sol,

Donc, au total, **120 à 150 sites présentant une vulnérabilité particulière**. En tenant compte de ce qu'une certaine proportion de ces sites pourrait être concernée, non pas par un seul facteur mais par la superposition de plusieurs d'entre eux, on retrouve l'ordre de grandeur global des cas de contamination relevés dans notre échantillon, soit 70% au niveau des réservoirs.

V.B. REFLEXION SUR LES SOLUTIONS A METTRE EN ŒUVRE

V.B.1. Réflexion préliminaire

D'abord, rappelons une évidence : la mise en œuvre de solutions curatives (c'est-à-dire essentiellement d'installations de purification des eaux, qu'elles soient ou non sophistiquées), sans s'être attaqué au préalable aux causes des contaminations par la mise en œuvre de solutions préventives, et la vérification de leur impact sur la qualité des eaux, n'aurait pas de sens. Et ceci pas uniquement pour de simples raisons économiques, mais aussi :

- Parce que cette mise en œuvre de traitements de purification va mettre des années à se mettre en place sur l'ensemble des captages de la région ; si elle peut être rapide sur une première génération de captages « urbains » prioritaires (voir paragraphe 5.2.3 ci-dessous), elle sera beaucoup plus longue à l'être pour les captage éloignés, non encore rattachés au réseau électrique; alors qu'une partie importante des contaminations qui peuvent les affecter peut se trouver rapidement réglée par la seule mise en application de mesures préventives,
- Parce que les techniques usuelles de désinfection, efficaces pour éliminer la plupart des microbes, bactéries et virus, ne peuvent toutefois détruire certains microorganismes parasites pathogènes. Il convient donc que les « eaux brutes » (comprises cette fois comme toutes les étapes situées en amont du point de traitement envisagé) soient en permanence de la meilleure qualité possible ;
- Parce que le « niveau » des traitements va dépendre de celui des contaminations attendues ; par exemple, en cas de chloration, il convient comme on le sait de conserver un taux de chlore résiduel libre à l'aval du traitement du réservoir pour traiter une contamination éventuelle ultérieure de l'eau dans le réseau ou les habitations ; il conviendra donc absolument d'éviter que de graves contaminations accidentelles, dues par exemple à un défaut d'entretien, à une longue interruption de la production, etc.... ne se produisent et ne puissent être annihilées par le traitement installé ;

Il découle de cette réflexion préliminaire que les solutions préventives qui vont maintenant être décrites devront, non seulement être appliquées prioritairement, en préalable à l'introduction progressive des solutions curatives, mais qu'elles pourront (et devront) concerner l'ensemble du parc, et être maintenues dans la durée, afin d'assurer en continu une bonne qualité bactériologique.

V.B.2. Solutions préventives

V.B.2.a. Sur les forages

- Maintenir propres les têtes de forage et les protéger contre l'introduction d'animaux (insectes, batraciens, reptiles,...) par l'installation de toiles moustiquaires ;
- Eviter les fuites d'eau de la colonne de refoulement, notamment au niveau des soupapes de tête, s'assurer de l'étanchéité des dalles de couverture béton, et éventuellement ajouter un petit rebord cimenté autour du tubage de tête pour empêcher le contact éventuel de celui-ci avec des eaux répandues ;
- Dans les cas de captages peu profonds où l'on pourrait avoir un doute sur l'étanchéité des cimentations de tête, un diagnostic plus complet de ces cimentations pourrait être envisagé, débouchant éventuellement sur des travaux de réfection ou de confortement ;
- En règle générale, maintenir propres en permanence les cabines de pompage, ou quand il n'en existe pas, les constructions plus ou moins légères qui protègent les têtes.

V.B.2.b. Sur les équipements de pompage

- Réparer ou remplacer les clapets de pied des pompes inopérants, et vérifier périodiquement que les colonnes restent pleines entre deux pompages ;
- Réparer d'urgence les fuites dans les colonnes ; remplacer les colonnes vissées dont le dévissage accidentel a été prévenu par la soudure de pattes, par des colonnes à brides ou par des tuyaux souples insensibles à la corrosion ;
- Remplacer les pompes à axe vertical ou installer sur leurs têtes des bâtis ad hoc pour les protéger des projections éventuelles.
- Le cas échéant, remplacer les pompes existantes par des pompes à débit moindre, de façon à augmenter les durées de pompage et diminuer les temps de séjour ; ce type de mesures pourrait concerner un certain nombre de pompes solaires, ainsi que des sites comme celui

de Gassambéry (réservoir le plus contaminé de l'échantillon des 25 forages étudiés), où la pompe actuelle qui produit 72 m³/h tourne moins d'une heure par jour en moyenne (et seulement 45 min/j en hivernage, ce qui conduit à la démarrer seulement tous les 3 ou 4 jours) ; un objectif raisonnable serait d'y limiter par exemple le débit à 20 m³/h.

- Pour les pompes solaires, généraliser rapidement l'adjonction de petits groupes électrogènes permettant de ne pas interrompre la production trop longtemps pendant les phases de forte nébulosité.

V.B.2.c. Sur les châteaux d'eau

- Effectuer systématiquement une visite technique permettant de diagnostiquer les possibilités de fréquentation par des oiseaux ou chauves-souris, concevoir et réaliser les travaux de protection nécessaires ;
- Analyser pour chaque site de production les durées de pompage et les temps de séjour correspondant au débit installé (après sa réduction quand cela s'impose, cf alinéa précédent) et au volume utile du réservoir, pour l'évolution actuelle (et future prévue) de la demande sur son cycle annuel ;
- Concernant l'évolution de la demande, on prendra bien entendu en compte les projets de valorisation du potentiel des points d'eau : extension des réseaux, développement d'autres usages parallèlement à la vocation prioritaire de l'AEP ;
- On déduira de cette confrontation (production installée/ demande) les adaptations des réservoirs qui permettraient de réduire les temps de séjour, de façon permanente ou saisonnière selon les cas ; ces adaptations pourraient consister en un tronçonnement du volume des châteaux d'eau concernés, soit par des cloisons verticales, soit par l'installation de prises de vidange étagées (solution éventuellement efficace pour l'abattement des concentrations en fer) ;
- Cependant, le problème du fer devra être étudié soigneusement pour chaque cas où l'on envisagera de réduire le temps de séjour, parce qu'il y a contradiction entre l'objectif de prévention des contaminations (qui plaide pour la réduction des temps de séjour) et celui d'abattement du fer par oxydation / précipitation (qui plaide pour leur augmentation) ;

V.B.2.d. Sur l'entretien des châteaux d'eau

Cet entretien pourrait être normalisé par la mise en place d'un code des bonnes pratiques, prévoyant la fréquence et le mode opératoire des opérations de nettoyage :

- Suivre les modes opératoires (produit, dosage, temps de contact...) et les fréquences d'entretien recommandées (tous les 6 mois, voire plus fréquemment si l'eau du forage est chargée en fer). Si besoin, faire appel à la division régionale de l'hydraulique, qui possède une équipe compétente en matière d'entretien des réservoirs. Il semblerait d'ailleurs important que les conducteurs de forage soient tous formés aux procédures de bon entretien des réservoirs, afin qu'ils puissent intervenir à tout moment si nécessaire. Certains programmes ont déjà axé leurs opérations sur ce transfert de compétence.

V.B.2.e. Sur les réservoirs au sol

L'objectif à mettre en œuvre le plus rapidement possible est, non pas de les supprimer, mais de les réserver uniquement à la distribution de l'eau animale ; tous les prélèvements à destination humaine (remplissage de bidons sur charrettes par siphonage) devraient par contre être supprimés, et remplacés, en attente de l'extension des réseaux, par des bornes-fontaines alimentées directement par les châteaux d'eau.

V.B.2.f. Sur l'éventualité, sur les sites à forte vocation pastorale, de spécialisation des captages

La possibilité de spécialiser certains forages existants (ou à créer) dans la production d'eau potable, avec un château d'eau dédié, pourrait en effet être envisagée. Ce type de solution pourrait en particulier se dégager dans l'avenir pour les forages sur lesquels un traitement combiné du fer et de la qualité bactériologique sera envisagé.

V.B.2.g. Sur les réseaux

Comme celui des châteaux d'eau, l'entretien régulier des réseaux fait partie des mesures normales en matière d'adduction d'eau. En effet, une purge et une désinfection des réseaux permettent d'éliminer l'eau stagnante, les biofilms et les matières en suspension (à mutualiser avec la désinfection des châteaux d'eau). Ceci s'avère encore plus nécessaire quand les eaux sont chargées en fer⁷.

D'autres mesures préventives peuvent aussi être envisagées à différents niveaux :

- Lors de la conception des réseaux, éviter les bras morts et les configurations qui favorisent la stagnation de l'eau dans les canalisations. Prévoir aussi un point bas de vidange pour faciliter l'entretien.
- Lors des travaux de construction, veiller au respect des règles d'hygiène, des plans établis, des matériaux...
- La gestion des réseaux devrait être pensée conjointement avec la gestion des forages, car il semble important d'éviter les baisses de pressions dans les canalisations. En maintenant une alimentation constante, sans coupure, afin que les canalisations ne se vident pas, cela limiterait le développement de micro-organismes (car conditions anaérobies et pression élevée défavorable) et l'entrée de contaminations par des points endommagés (fuites, corrosion...).

V.B.3. Solutions curatives

V.B.3.a. Sur les forages

Dans les cas où la poursuite des mesures montrerait l'existence d'une contamination chronique de l'eau brute, due par exemple à une introduction avérée d'animaux (invasion de punaises à Soryngo), étudier avec la DRH la possibilité d'effectuer un lavage au chlore de la chambre de pompage (sans ou avec sortie de la pompe pour effectuer brossage et air-lift);

V.B.3.b. Sur les châteaux d'eau

Traitements de désinfection :

Ceux-ci semblent être évidemment incontournables sur le long terme. On sait que l'éventail des solutions techniques est assez large (chloration, ozonation, rayonnement ultraviolet éventuellement alimenté par énergie photovoltaïque, filtration lente). Il est certainement trop tôt pour décider quelle sera la (ou plus probablement les) solution(s) à appliquer, mais on peut déjà apporter les éléments suivants :

- Le principal avantage de la chloration est que c'est la seule solution assurant une rémanence pour le temps de séjour dans le réservoir et de transit dans le réseau ; de façon à assurer un bon brassage et un temps de contact suffisant (minimum 30 min), il est probable que l'injection de la solution-mère devra s'effectuer à l'entrée du réservoir⁸ ;

⁷ On rappellera ici l'étude réalisée en 2011 par AQUASSISTANCE sur le forage et le réseau de Synthiou Garba, qui a montré l'existence l'alternance de zones de dépôt et de remise en suspension, propices aux proliférations bactériennes, et a proposé en première phase un traitement simple par curage hydraulique.

⁸ Mais il existe également la possibilité de « pots chlorateurs » disposés dans le fond du réservoir

- Au rang de ses inconvénients, on citera la détermination de la dose de chlore (« niveau de traitement », voir paragraphe V.B.1), la préparation et la conservation de la solution-mère, la nécessité de contrôler fréquemment la concentration en chlore résiduel libre,...
- Tous les traitements nécessitent de l'énergie (comme le pompage) ; un branchement au réseau est un avantage, mais pas une nécessité, puisque le traitement peut profiter de l'énergie qui alimente la pompe (groupe électrogène, photovoltaïque), avec cependant des sujétions (heures de disponibilité) ; il y aura donc une analyse approfondie à effectuer au cas par cas ;
- Mais dans tous les cas, la principale réflexion devra porter sur le taux de fer (ce qui impliquera une connaissance suffisante de la concentration et de ses variations dans le temps) et, dans tous les cas où celui-ci dépassera une limite à définir (par exemple 2 mg/l), sur la nécessité d'effectuer un traitement simultané de déferrisation et de désinfection ; on sait en effet que la chloration, comme la stérilisation par UV, ne sont efficaces que sur des eaux claires. Or, la présence de fer colloïdal conduit à des colorations importantes susceptibles de perturber fortement les traitements, et un traitement par aération/décantation, complété ou non par une filtration, devra alors être intercalé en amont de la désinfection, qui s'effectuera alors sur une eau déjà partiellement traitée.

V.B.3.c. Dans les réseaux

Procéder à la réparation des fuites et surveiller l'état des canalisations.

Dans les cas des réseaux très étendus, impliquant des temps de transit très long, l'éventualité de devoir procéder à des désinfections complémentaires pourra être envisagée. Comme proposé par AQUASSISTANCE dans le cas de Synthiou Garba (voir paragraphe V.B.2.g), comme la simple charge fournie par les châteaux d'eau peut s'avérer insuffisante pour les longs réseaux, l'installation d'accélérateurs en sortie de réservoir peut s'avérer nécessaire.

V.B.3.d. Aux points de consommation

Il existe des solutions individuelles adaptées (filtres, filtres-bougies céramique, désinfectants...). Nous rappellerons en conclusion de ce paragraphe sur les solutions curatives que l'idéal n'est pas de désinfecter l'eau, mais surtout de prendre toutes mesures préventives pour éviter sa contamination, en amont comme en aval du point de désinfection. Il ne faut pas que les populations en viennent à croire que le traitement est une protection absolue. Il reste donc essentiel, d'une part de tout faire en amont pour préserver la qualité des eaux brutes, d'autre part de sensibiliser préalablement la population aux problèmes d'hygiène et de santé pour qu'elle comprenne bien les raisons et les méthodes d'intervention, et change si nécessaire ses comportements. Quel que soit le moyen utilisé, le traitement ne doit donc pas précéder mais suivre les campagnes d'éducation sanitaire.

V.B.4. Définition des priorités

La **première priorité** serait de mettre en œuvre l'ensemble des solutions préventives sur les 25 sites-tests qui ont fait l'objet de cette étude, en commençant par celles qui portent sur les forages et les équipements de pompage, ainsi que les petites réparations sur les châteaux d'eau. Cette mise en œuvre peut se réaliser rapidement parce que les mesures susceptibles d'améliorer efficacement la qualité bactériologique de ces sites sont pour l'essentiel connues, et devraient être maintenant communiquées aux gestionnaires de ces installations pour intervention.

En ce qui concerne l'analyse comparée de la demande, du débit des pompes installées et de la capacité de stockage des réservoirs, celle-ci devrait être initiée rapidement par les gestionnaires, de façon à permettre une première tranche d'interventions prioritaire. Elle pourrait alors conduire en premier lieu à des remplacements de pompe, en second à des aménagements des châteaux d'eau pour réduire les temps de séjour excessifs, saisonnièrement ou sur l'année. La durée de cette première tranche d'action pourrait être de 1 à 2 ans maximum.

En **deuxième priorité**, un programme d'extension des mesures préventives à l'ensemble du parc des forages pourrait être étudié et mis en œuvre. Ce programme pourrait concerner successivement :

- l'ensemble des 33 forages solaires (moins les deux sites-tests où des améliorations auraient déjà été mises en place), -
- l'ensemble des 10 à 20 sites comportant des réservoirs au sol à utilisation mixte AEP / bétail
- l'ensemble des forages dans lesquels il existe des problèmes signalés dans le matériel de pompage (colonnes de refoulement et clapets des pompes)
- l'ensemble des 50 à 70 ouvrages (moins les solaires) dans lesquels il existe un surdimensionnement de la production par rapport à la demande, conduisant à des temps de séjour excessifs,
- progressivement les ouvrages restants

La durée de cette deuxième tranche d'action pourrait être de deux à trois ans.

Dans le même temps, il semble essentiel de reprendre des mesures périodiques de la qualité bactériologique (et du fer), en commençant par tout ou partie des forages-tests, notamment aux fins d'analyse de l'incidence des mesures préventives qui leur auront été appliquées. La définition d'un programme systématique visant l'ensemble des forages du parc paraît également nécessaire. Parallèlement, il semble nécessaire d'introduire sans plus attendre la réflexion parallèle sur le traitement combiné du fer et la désinfection, et son corollaire dans le domaine de la spécialisation éventuelle de certains ouvrages dans la production d'eau déferrisée / désinfectée.

En **troisième priorité**, une première tranche d'introduction de mesures curatives serait à étudier. Après la réalisation éventuelle de traitements ponctuels des quelques forages concernés par des contaminations chroniques des tubages (voir paragraphe V.B.3.a, traitements curatifs dans les forages), un programme d'introduction de traitements de désinfection (avec prise en compte de la composante « fer ») serait alors préparé, il porterait successivement sur :

- les forages « urbains » à forte production d'eau potable (Ourossogui, Thilogne, Agnam Civol, Waounde, Orkadiere, ...)
- les forages du PHAR,
- d'autres forages jugés prioritaires, à cause soit de problèmes chroniques de contamination non résolus par l'application des mesures préventives, soit de leur forte production d'eau potable associée à la permanence de risques de contamination accidentelle,
- le reste des forages, l'objectif final de la démarche étant la production contrôlée d'eau exempte de contaminations sur tous les sites de production d'eau potable.

La première tranche de mise en place de stations de désinfection, couplée ou non selon les cas avec la déferrisation, pourrait s'envisager dans un délai de trois à cinq ans.

VI. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

VI.A. CONCLUSIONS

Les éléments à retenir pour caractériser en première approche la qualité bactériologique des eaux destinées à la boisson en région de Matam sont les tendances lourdes qui se dégagent de l'analyse des résultats. Rappelons-en la liste :

1 / Les eaux superficielles et celles des puits non équipés sont chroniquement contaminées à un niveau élevé.

2 / Les eaux brutes des forages sont rarement contaminées, et quand elles le sont, jamais sévèrement ; l'attribution de notes représentatives de la salubrité de l'eau permet de constater que, globalement, elles sont 400 fois moins contaminées que celles des puits non équipés et des eaux superficielles.

3 / Dans ces cas de contamination des eaux brutes, il est certain que celle-ci ne provient pas des aquifères eux-mêmes (qui sont complètement protégés d'éventuelles infiltrations) ; elle peut par contre provenir, soit de sources de pollution à l'intérieur des forages ou des colonnes de refoulement, soit de retours à partir de réservoirs contaminés.

4 / Environ 50 % des réservoirs sont contaminés au moins sur l'une des 4 campagnes ; le plus souvent légèrement (contaminations accidentelles), parfois moyennement ou sérieusement (44 % des contaminations, dont au moins 75 % sont nées dans les réservoirs)

5 / Les réservoirs au sol (qui alimentent le bétail, mais aussi des populations non raccordées), sont systématiquement contaminés à un niveau élevé.

6 / Les causes des contaminations sont, par ordre d'importance décroissante :

- le fonctionnement intermittent de certaines installations (particulièrement en période d'hivernage) et plus généralement leur faible taux d'utilisation, générant des temps de séjour de l'eau trop élevés,
- la dégradation de certains équipements d'exhaure (fuites dans les colonnes de refoulement, absence ou mauvais fonctionnement des clapets anti-retour),
- des défauts d'entretien des réservoirs, qui sont de deux ordres :
 - des petites avaries qui permettent l'entrée et la fréquentation d'animaux (oiseaux essentiellement)
 - des campagnes d'entretien périodiques trop rares ou mal réalisées,
- des têtes de forage mal protégées contre l'introduction d'animaux ou de contaminants divers,
- et dans le cas particulier des réservoirs au sol un mode de distribution de l'eau (siphons et bournier périphérique) complètement inadapté.

7 / La contamination des réservoirs se propage dans les réseaux, mais a tendance à diminuer légèrement en s'éloignant d'eux. Il peut exister des cas de contamination directe des réseaux, mais ils sont très rares.

VI.B. RECOMMANDATIONS

1/ Il convient d'abord que les résultats de cette étude soient bien compris et partagés par ses principaux destinataires, en particulier par l'OFOR et la DRH ; ceux-ci devront ensuite les répercuter vers les gestionnaires directs des installations de production de l'eau potable, ASUFOR et communes. Ce sont en effet les ASUFOR, puis progressivement les opérateurs privés de maintenance et de production, qui devront mettre en œuvre le plus rapidement possible les mesures préventives, puis à plus ou moins long terme les mesures curatives.

2/ Concrètement, le partage des résultats avec les gestionnaires directs pourrait s'effectuer d'abord de façon globale avec l'ensemble des ASUFOR, sans fournir le nom des sites concernés, mais en les présentant comme des cas-types. Il est en effet fondamental que tous les acteurs de la production et de la distribution de l'eau potable comprennent bien comment naissent les contaminations, et comment on peut les éviter et les combattre. Tel forage aujourd'hui contaminé ne le sera plus demain après l'adoption des mesures préventives. Tel autre aujourd'hui sans problème peut se trouver demain contaminé par non-respect d'une des consignes de base.

3/ A l'issue de cette phase, la communication des résultats aux ASUFOR devrait être envisageable. Elle serait assortie de l'explication des mesures préventives nécessaires, celles-ci nécessitant deux niveaux d'intervention :

- Pour les mesures relevant de l'entretien normal des installations (propreté des têtes de forage et des locaux, interventions simples sur les châteaux d'eau, fuites sur les colonnes, clapets, amélioration des entretiens périodiques...), celles-ci pourraient être rapidement mises en œuvre par les ASUFOR avec l'aide de la DRH et de l'OFOR ;
- Pour ce qui relève de l'adaptation de la production à la demande aux fins de réduction des temps de séjour, une réflexion préalable est à mener au cas par cas, prenant en compte la demande et ses variations annuelles, le débit, le volume des réservoirs et les possibilités de les cloisonner, etc.... ; une démarche commune DRH / OFOR paraît alors nécessaire.

Le partage des résultats avec les élus nous semble un élément incontournable de leur responsabilisation et de la bonne mise en œuvre des mesures préventives. En ce sens, nous recommandons l'application de la démarche des PGSSE, mise en place en Casamance sous l'impulsion d'ACRA Sénégal, qui nous paraît exemplaire, en ce qu'elle est basée sur une implication effective de l'ensemble des acteurs locaux impliqués directement ou indirectement dans le dispositif d'approvisionnement en eau potable de la communauté : services techniques déconcentrés, collectivités locales, ASUFORs, ONG, structures de recherche.

4/ Dans la mesure de ses moyens, ADOS est prêt à répondre à toutes les questions, et à participer à ce partage des résultats à tous les niveaux, ainsi qu'à la préparation concrète des solutions.

5/ Les forages du PHAR, qui sont pour certains d'entre eux, comme on l'a vu, concernés par des contaminations, pourraient donner lieu à un protocole d'appui particulier, dans le cadre d'une prolongation des actions d'accompagnement des communes et de suivi technique régulier; ils pourraient également servir de sites-tests pour la mise en place et le suivi des résultats des mesures préventives. Il serait logique de leur adjoindre le forage de Waoundé, qui alimente une population importante et qui fait l'objet par ailleurs d'une démarche parallèle sur l'assainissement et la salubrité.

6/ La poursuite des prélèvements et des mesures de qualité bactériologique, avec l'équipe de l'Hôpital de Matam et l'application des méthodes pour lesquelles elle a été formée, semble être une nécessité incontournable. Pour cela, un programme pourrait être mis au point par l'OFOR avec l'aide d'ADOS ; ce programme comporterait plusieurs volets, correspondant à des niveaux de priorité :

- Priorité 1 : poursuite des mesures sur les 7 forages du PHAR, avec une fréquence à définir (3 ou campagnes par an ?),

- Priorité 2 : extension à tout ou partie du reste des 17 forages restants de l'échantillon-témoin des sites (idem),
- Priorité 3 : extension progressive à l'ensemble des forages du Parc, en commençant par exemple par un échantillon plus consistant de forages solaires (5 ?), en continuant par des forages à forte production d'eau potable (type Ourossogui).

7/ Développer un processus visant la mise en place d'unités de désinfection sur certains sites, non appuyée sur des mesures et un diagnostic sérieux, et sans application préalable de mesures de prévention, telle qu'elle commence à être évoquée dans certaines réunions, nous semblerait être une grave erreur.

En matière d'hygiène, la mise en place de mesures préventives, comprises et acceptées par la population, doit toujours précéder l'introduction de traitements curatifs.

8/ Les auteurs espèrent avoir suffisamment défriché le terrain pour apporter une vision synthétique de la qualité bactériologique des eaux de consommation en région de Matam, et proposer des solutions propres à lutter efficacement contre les maladies hydriques.

Ils restent conscients de ce que l'exploitation des données serait perfectible, notamment par un traitement statistique des résultats qui permettrait de prendre en compte l'intégralité des données disponibles. Ils attirent l'attention sur le caractère incomplet de ces résultats, qui plaide pour une poursuite des mesures comme proposé ci-dessus, ainsi que pour la nécessité de les étendre rapidement à la totalité des points d'eau potable.

