

Le fer dans les eaux souterraines de la région de Matam

Bertrand PLUS Septembre 2014

(Annexe de l'article SINTHIOU GARBA : D'UN PROGRAMME A L'AUTRE)

Depuis octobre 2012, **ADOS** mène avec la **Direction Régionale de l'Hydraulique de Matam** un **inventaire général des captages** de la Région. A ce jour, environ 150 captages ont été visités et ont fait l'objet d'enquête et de mesures. Parmi les paramètres mesurés, la concentration en fer l'a été dans 117 ouvrages, permettant d'amorcer une synthèse sur cet élément. En attendant cette synthèse qui devrait être disponible au début 2015, quelques rappels peuvent être énoncés et quelques résultats provisoires fournis.

1 / Rappels sur l'hydrochimie du fer dans les nappes

La présence de fer dans les nappes profondes est fréquente. Son origine est naturelle, par dissolution de minéraux ferreux (pyrite) ou ferromagnésiens (micas) fréquents dans les roches anciennes, ou de nodules ferrugineux, notamment dans les eaux riches en CO². Le fer dissous dans ces eaux dépourvues d'oxygène se trouve sous sa forme réduite (Fe²⁺). Dès qu'il se trouve en présence d'oxygène, cet ion s'oxyde en Fe³⁺, et le fer dissous se transforme alors en hydroxyde ferrique Fe(OH)₃ insoluble dans l'eau, qui précipite donc aussitôt.

Cette précipitation commence, normalement, dès le premier contact avec l'air, c'est-à-dire dans le premier réservoir (château d'eau en général).

La précipitation des hydroxydes ferriques peut se trouver accélérée par le développement de *bactéries*, qui tirent leur énergie de la transformation des sels ferreux en sels ferriques. Ces bactéries rendent les dépôts plus collants (de type boue gélatineuse), aggravant les phénomènes de colmatage.

2 / Rappels sur les conséquences de la présence de fer à des concentrations excessives

a / **Dans l'eau de boisson**, le fer est jugé sans influence sensible sur la santé (*l'OMS fixe 0.3 mg/l comme maximum acceptable, et 1.0 mg/l comme maximum admissible*)¹. Cependant, les bactéries peuvent générer des problèmes de goût et d'odeur, et les fortes concentrations peuvent tâcher le linge. Dans le contexte de la région de Matam, il devient alors compréhensible que les populations répugnent à boire une eau – désormais payante - qui se colore en orange en quelques minutes, alors que celle du puits, ou celle du Fleuve, traditionnellement utilisées, étaient exemptes de fer, et le plus souvent gratuites...

Cet état de fait a tendance à limiter l'utilisation de l'eau distribuée, pourtant de bien meilleure qualité bactériologique, au profit des ressources traditionnelles qui sont, elles, nettement plus contaminées, et donc à freiner le recul des maladies hydriques, notamment dans les contextes où une forte concentration

¹ Son absence de nocivité à des concentrations atteignant ou dépassant 4 à 10 mg/l comme dans certains des forages mesurés mériterait cependant d'être vérifiée.

en fer se superpose à un prix de vente élevé de l'eau du réseau et à une relative disponibilité des ressources traditionnelles.

b / Pour les captages et les installations d'exhaure

Certaines des bactéries du fer sont anaérobies (siderocapsaceae), et peuvent donc générer des dépôts en amont du premier contact avec l'air, en l'occurrence dès la crépine du forage, réduisant ainsi, parfois fortement, sa productivité.

L'oxydation des sels ferreux – accélérée ou non par des bactéries aérobies – débute quant à elle au premier contact avec l'air, c'est-à-dire dans le réservoir. Il y a alors, si le temps de séjour dans le réservoir le permet, une première précipitation dans le fond de celui-ci. Le nettoyage périodique des dépôts, qui peuvent atteindre plusieurs centimètres d'épaisseur en quelques mois, s'avère alors à la fois une contrainte et une façon d'éliminer une partie du problème (parce que chaque vidange complète du réservoir doit entraîner une partie des dépôts dans le réseau).

Enfin, les dépôts colloïdaux ferrugineux peuvent s'avérer corrosifs dans certains contextes physico-chimiques, et augmenter les vitesses d'attaque sur les crépines, les pompes et les conduites.

c / **Pour les réseaux**, les fortes concentrations de fer (au-delà de 1mg/l par exemple), deviennent catastrophiques. Elles génèrent en effet des dépôts qui peuvent les colmater rapidement, limitant fortement les débits, et pouvant même en obstruer complètement certaines portions . Au niveau des compteurs d'eau, plusieurs ASUFOR ont constaté que les compteurs de type « noyé »² pouvaient se colmater complètement en un mois..., nécessitant des passages incessants pour les nettoyer, et rendant alors les comptages très approximatifs.

d / **Pour l'irrigation**, la présence de fer au moins jusqu'à des concentrations de l'ordre de 2 mg/l est décrite comme favorable à la croissance des végétaux. Elle se révèle par contre particulièrement catastrophique pour les systèmes d'irrigation localisée, pour des raisons évidentes de colmatage des capillaires et des goutteurs.

En conséquence, la présence de fer en excès nécessite un traitement efficace de déferrisation, que ce soit pour l'eau potable ou pour l'irrigation. La **limite à partir de laquelle ce traitement devient nécessaire** est certainement très variable suivant le contexte (population concernée, énergie disponible, niveau d'acceptabilité de la population...), et ce point serait l'un des principaux à préciser pour l'avenir. On notera que la SDE a dû réaliser la station de déferrisation de la ville de Matam, la seule en service à ce jour sur l'ensemble de la région, alors que l'eau d'un seul de ses forages présentait une concentration notable (F2 : 1.5 mg/l), celle du second restant faible (F1 : 0.05 mg/l), et ce à la suite de plaintes de la population.

On fixera provisoirement cette limite à 0.5 mg/l dans l'eau brute.

² Les compteurs de type « sec » ne présentent pas cet inconvénient, mais ils seraient deux à trois fois plus coûteux.

3 / Principaux enseignements de l'inventaire ADOS – DRH de Matam en cours :

3.1 Un phénomène prédominant dans les « nappes profondes » en région de Matam

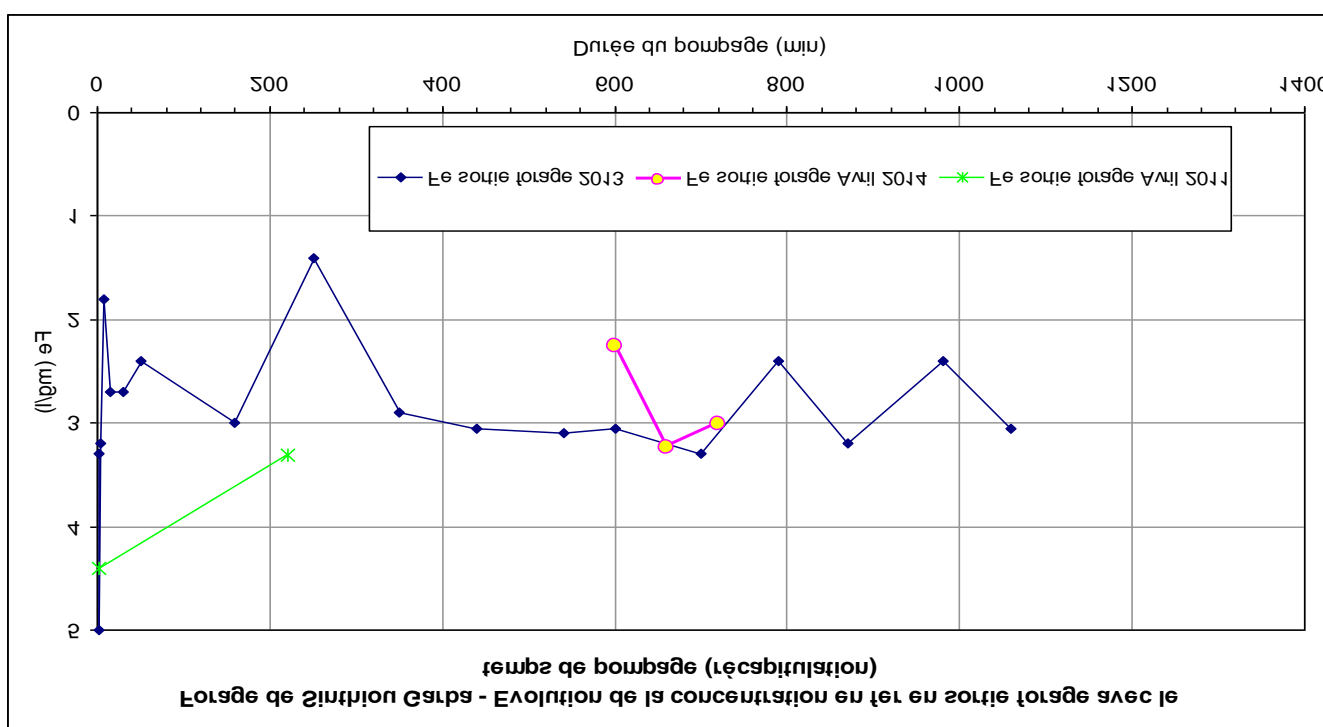
La majorité des captages inventoriés (puits dans les nappes superficielles mis à part) ont du fer en excès dans leur eau: sur les 85 forages ayant pu être mesurés avant tout contact avec l'air, 56 (soit 66%) ont plus de 0.5 mg/l de Fe, 47 (55%) ont plus de 1 mg/l, 26 (31%) plus de 2 mg/l, et 6 (7%) plus de 5 mg/l. Les valeurs extrêmes vont de < 0.01 (6 valeurs) à > 25 mg/l (Tekinguel F2).

3.2 Une concentration variable dans le temps et l'espace

Pour un captage donné, il existe une grosse variabilité de la concentration avec la **durée du pompage et le point de prélèvement**.

- a) L'existence de fortes variations de la concentration en fer durant les cycles de pompage peut être illustrée par la figure ci-dessous, qui récapitule plusieurs séries de mesures effectuées en sortie de pompe du forage de Sinthiou Garba.

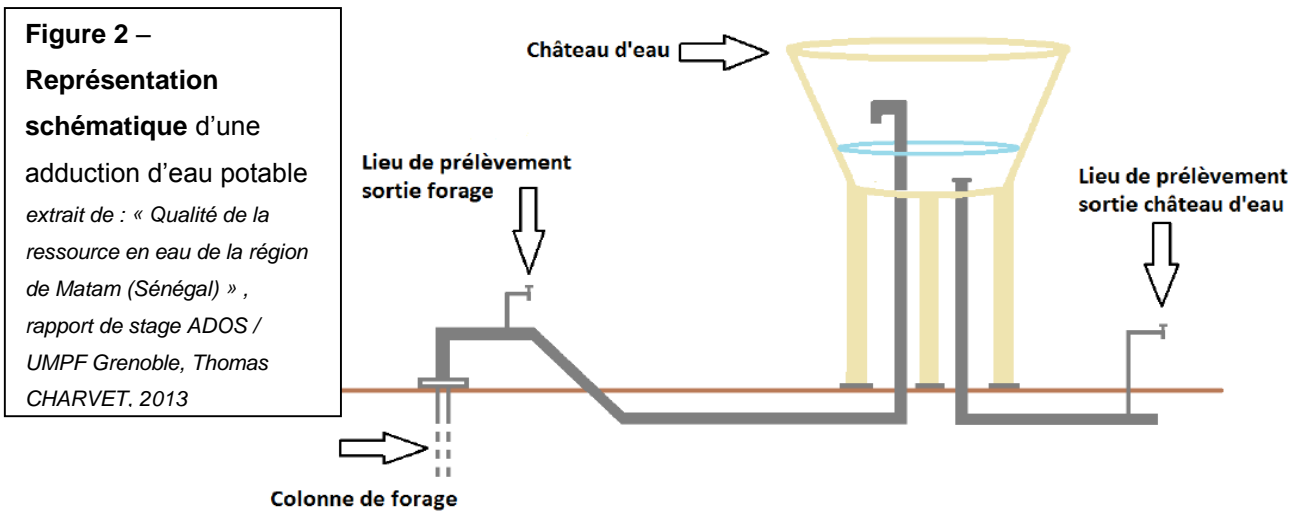
Figure 1 – Influence de la durée du pompage sur la concentration en fer



On voit que les concentrations mesurées sont très variables, allant de 5 à 1.4 mg/l. Même si des variations de détail, de l'ordre de +/- 0.5 mg/l au maximum, peuvent être imputées à la précision des mesures, il est certain que la concentration subit d'importantes variations, notamment

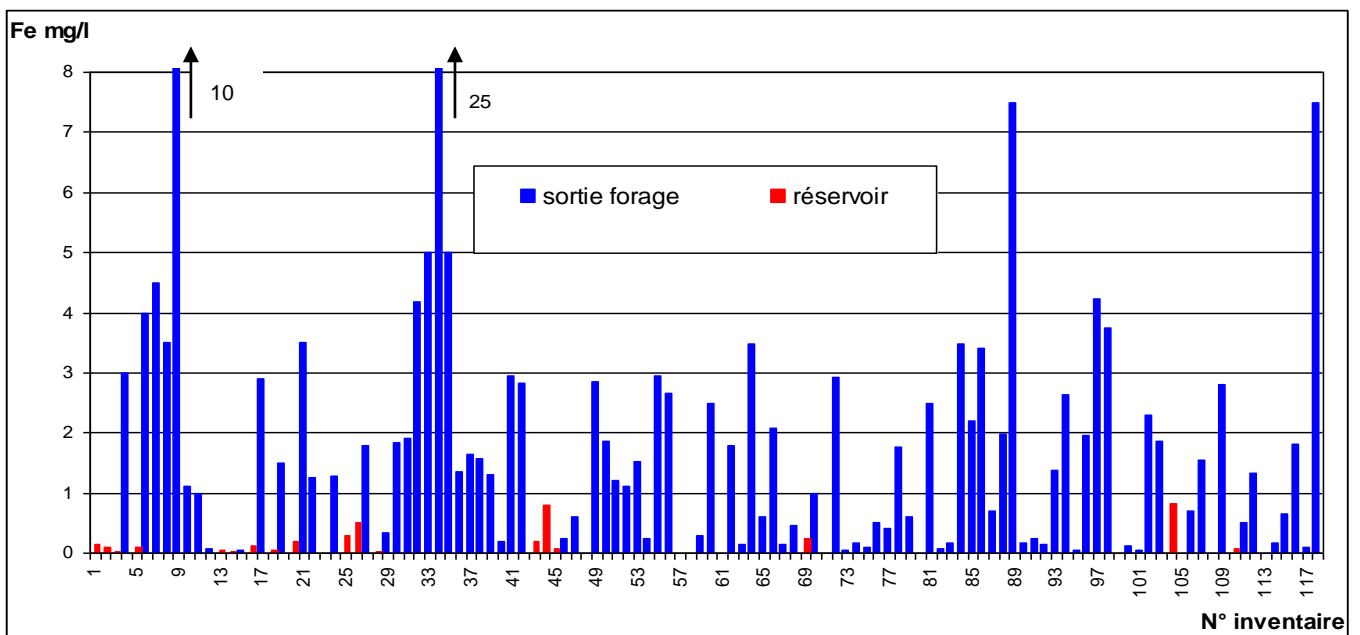
pendant les 10 premières minutes du pompage où l'on passe de 5 mg/l en deuxième minute à 1.8 mg/l à la septième. Des phénomènes analogues ont pu être mesurés sur d'autres forages. Ceci conduit d'une part à relativiser la portée de mesures isolées effectuées en démarrage de la pompe, d'autre part à chercher à préciser ce phénomène, qui pourrait conduire à envisager de by-passer les premières minutes de pompage si la masse de fer envoyée dans le réservoir dans ces premières minutes s'avérait réellement notable.

b) En ce qui concerne **le point de prélèvement** (la figure ci-dessous illustrant les deux points de prélèvements les plus fréquents), les variations sont également très importantes, même si elles ne sont pas systématiques.



La figure 3 ci-dessous distingue les concentrations obtenues sur l'ensemble des captages mesurés selon la localisation du point de prélèvement. On constate la forte prédominance de fortes valeurs dans

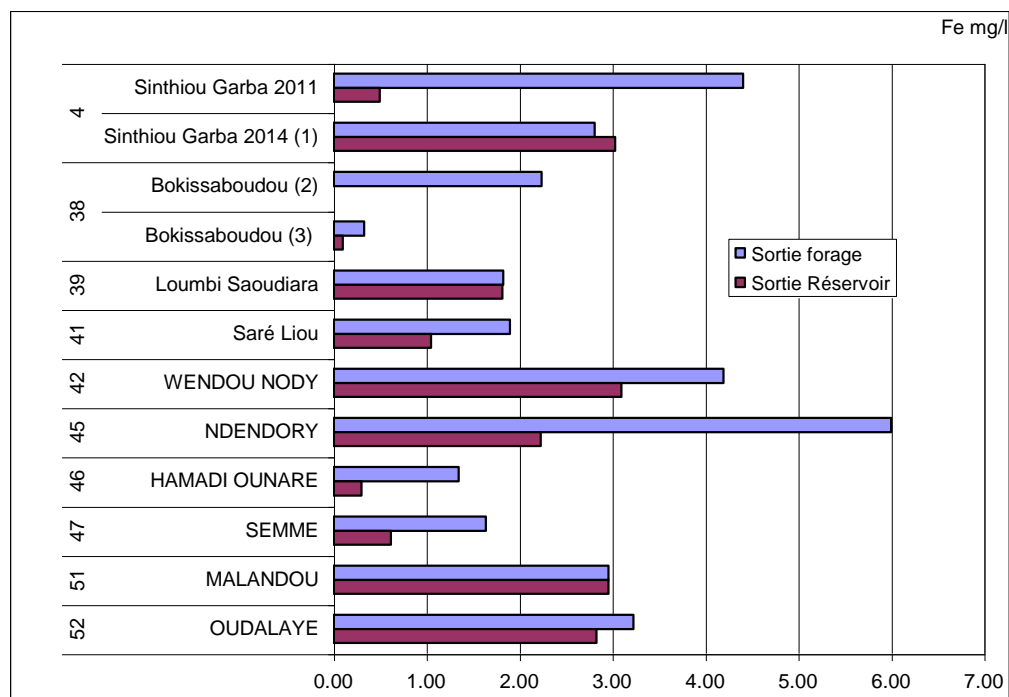
Figure 3 – Concentration en fer selon les points de prélèvement



les échantillons pris en sortie des forages³ (moyenne sur 96 valeurs 1.97 mg/l, contre 0.2 mg/l sur 19 valeurs pour ceux prélevés en sortie du réservoir).

Ce phénomène, lié de toute évidence à la précipitation du fer après son aération, a pu être précisé sur quelques forages où l'on a pu prélever aux deux points de mesure.

**Figure 4 –
Abattement de
concentration
dans le
réservoir**



(1) Moyenne de 3 valeurs sur 3h

(2) Après 3 min de pompage

(3) Après 15 min de pompage

On constate qu'il existe, dans la majorité des cas, un abattement significatif, parfois d'un facteur 3 à 5, mais que cet abattement n'est pas systématique: au moins 3 forages fournissent la même concentration aux deux points de prélèvement. On rejoint là l'autre phénomène, la variation dans le temps, comme l'illustrent les deux couples de valeurs disponibles sur le forage de Sinthiou Garba : très fort abattement en 2011, pas d'abattement en 2014.

Tout ceci illustre la complexité des phénomènes, et conduit à relativiser les mesures isolées. Or il faut bien constater qu'une mesure coûte cher, sinon en réactifs, du moins en temps de l'équipe chargée de l'inventaire. Il faut parfois près d'une journée pour rejoindre un forage lointain...

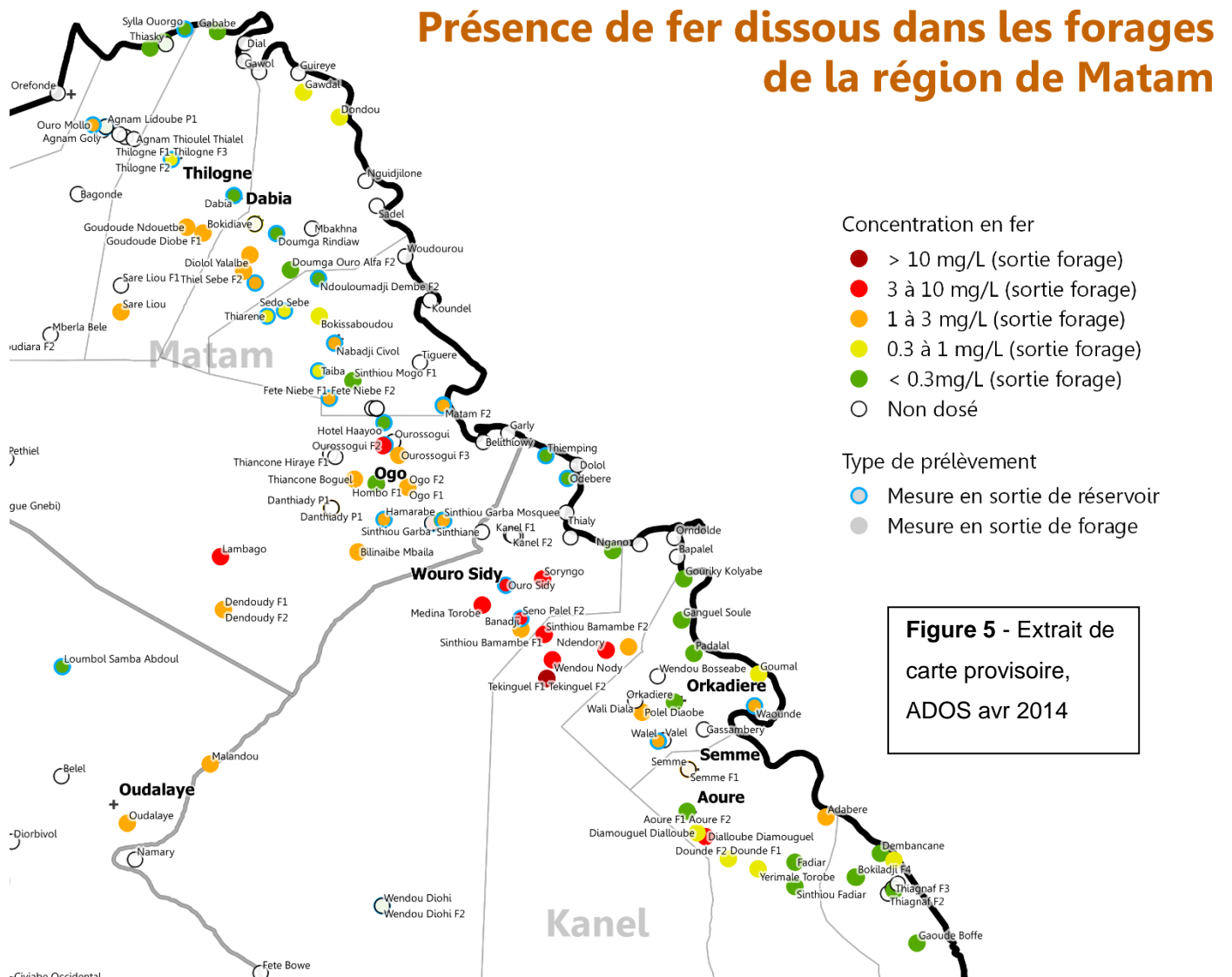
Et, lors d'une visite de terrain, on ne maîtrise évidemment pas (ou rarement) le régime de pompage, et l'on se trouve donc tributaire des conditions régnant à l'heure de la visite. Si le forage est en pompage, le prélèvement s'effectue de préférence en amont du réservoir, pourvu qu'il existe une prise directe sur le refoulement (ou une fuite...). Mais si le forage est à l'arrêt, on ne peut prélever l'échantillon que dans le réservoir (soit à partir d'une prise sur la vidange, soit par siphonage dans le cas des réservoirs au sol). Et le temps de séjour de l'eau dans le réservoir est alors très variable, et souvent difficile à déterminer...

³ On conservera dans cette note, par souci d'homogénéité, l'expression « sortie forage » même si un petit nombre des captages inventoriés sont des puits. Il faudrait en toute rigueur parler de « sortie de pompe ».

3.3 Répartition dans l'espace et avec la profondeur

Parmi les critères pouvant expliquer la variation des concentrations en fer, il est évident que l'on va d'abord s'attacher à rechercher l'influence de la localisation géographique, et celle des aquifères captés.

Pour la **localisation géographique**, on fournit ci-dessous un extrait d'une carte provisoire préparée par ADOS sur la base des données collectées en avril 2014. Il semble en résulter une confirmation de tendances déjà évoquées antérieurement, à savoir l'existence de **trois zones** :



- Une zone alignée sur la rive gauche du Fleuve (appelée Dandé Mayo), où les concentrations en fer sont généralement basses (< 0.3 mg/l, ou au maximum, < 1 mg/l),
- Une zone parallèle au Fleuve, jouxtant la précédente mais située de deux à cinq kilomètres à l'intérieur des terres, sur le rebord de la plaine alluviale (Diéri), globalement alignée sur la route nationale RN2 : c'est là que les concentrations sont généralement les plus élevées, avec une zone particulièrement chargée à l'ouest et au sud de Matam, allant d'Ourossogui à

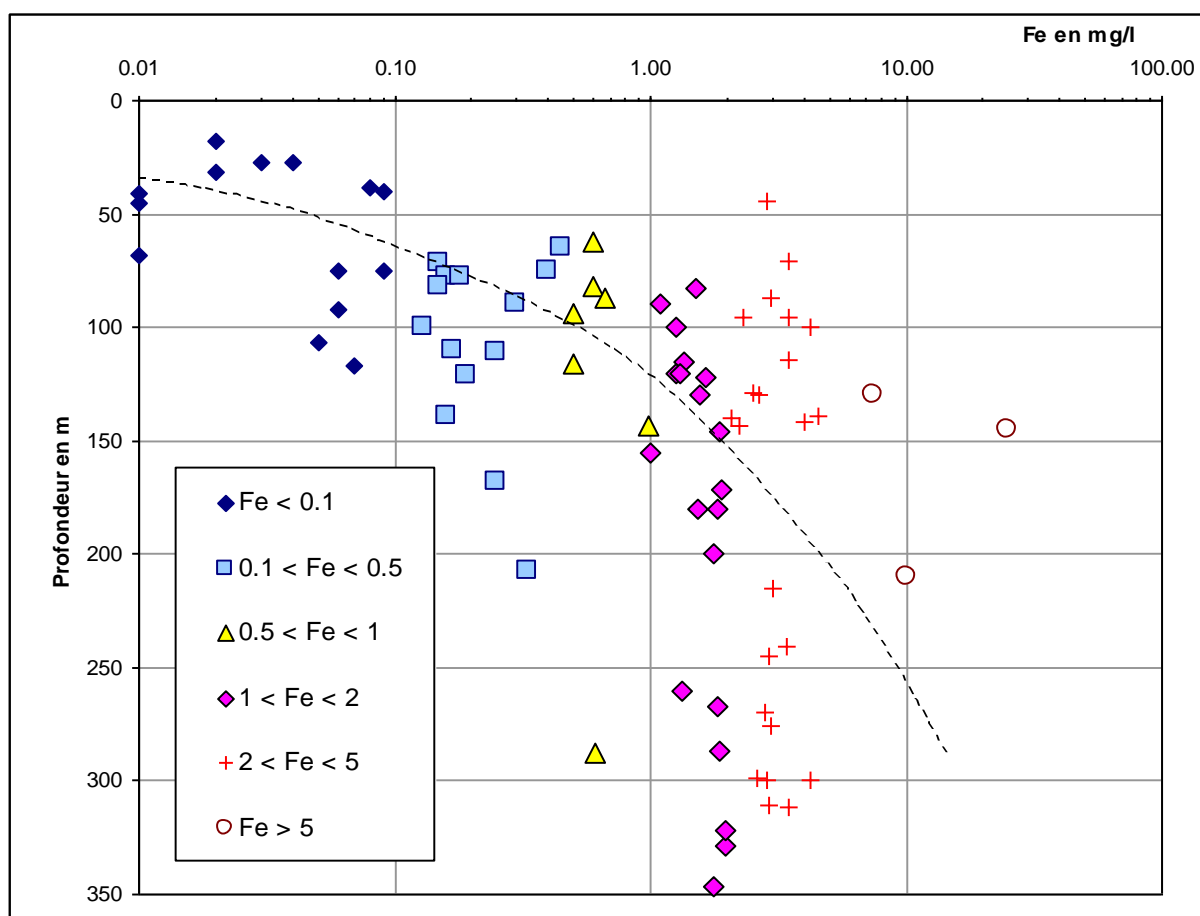
Tekinguel. C'est également là que l'on trouve le plus grand nombre de forages, car c'est la zone la plus peuplée.

- Une zone « interne » s'étendant à l'ouest de la précédente, correspondant au bassin du Ferlo (grand bassin hydrographique anciennement drainé vers le Lac de Guiers et l'aval du Fleuve, devenu en grande partie endoréique) : là, les concentrations, moins bien connues, semblent décroître par rapport à la zone précédente, mais le fer semble toutefois rester présent partout.

L'attribution d'un aquifère à chaque captage est compliquée dans le détail, et nécessite des informations qui ne sont pas toujours disponibles. Cependant, la profondeur des ouvrages est un assez bon indicateur. On peut en effet considérer :

- que les captages (puits ou forages) de moins de 30 à 40m de profondeur captent la nappe alluviale (dans le Dandé Mayo), ou la nappe éocène (dans le Diéri).
- que les forages de plus de 90m de profondeur captent tous l'aquifère multicouches du Maestrichtien
- que les ouvrages de profondeur intermédiaire peuvent capter, soit le Continental Terminal, soit le Paléocène, soit les niveaux supérieurs du Maestrichtien ; il s'agit en général de faciès détritiques assez semblables à ceux du Maestrichtien sensu stricto, c'est-à-dire d'une alternance de niveaux argileux et sablo-gréseux.

Figure 5 – Relation concentration en fer (sortie forage) / profondeur des captages



La figure 5 ci-dessus, tracée en échelle logarithmique pour mieux distinguer les faibles valeurs, ne révèle cependant aucune relation évidente entre le fer et la profondeur des captages. La courbe de régression tracée, avec un coefficient r^2 de seulement 0.45 reste bien peu significative.

Cependant, dans le détail, on relèvera que la majorité des points de la classe Fe < 0.1 mg/l se situent dans les faibles profondeurs⁴, et que l'essentiel des fortes valeurs (> 1 mg/l de Fe) concernent des forages de plus de 90m de profondeur.

En conclusion sur les **facteurs susceptibles d'expliquer** les fortes variations qui affectent la concentration en fer, force est de constater que, pour le moment, il n'existe encore aucune explication réellement convaincante. Le tracé d'une carte définitive, avec si possible vérification de certaines valeurs « hors tendance générale », devrait en tous cas constituer une première étape importante.

4 / Thèmes de réflexion pour un programme d'action

Pour pouvoir agir efficacement sur les nuisances associées à l'excès du fer, qui ne concernent, rappelons-le, que les réseaux, le pire serait de se lancer dans une coûteuse campagne de construction de stations de déferrisation avant d'avoir réfléchi et approfondi les connaissances, de façon à apporter des réponses suffisamment étayées aux trois questions classiques « Où ? Pourquoi ? Comment ? » A savoir :

- Où y a-t-il du fer en excès (dans l'espace et dans le plan vertical)?
- Pourquoi, c'est-à-dire pourquoi dans ce captage, et pas dans cet autre ?
- Comment s'en débarrasser ?

En fait, l'approche est plus complexe, et on peut y discerner trois niveaux.

Niveau 1 : l'interprétation des données de l'inventaire ADOS / DRH de Matam

Cette interprétation, assortie d'une réflexion, devra s'effectuer dans deux directions :

1a / La caractérisation du phénomène

Cette caractérisation fera appel essentiellement à l'hydrogéologie.

Première étape incontournable, la cartographie (où ?). La carte définitive des concentrations issue de l'inventaire en cours devrait apporter la réponse, dont on sait déjà qu'elle concernera une part importante du territoire de la région de Matam.

Deuxième étape, également déjà abordée, pour l'instant sans grand succès, dans cette note : dans quels aquifères, et avec quel contexte lithologique, de recharge ou de relations avec les nappes superficielles, d'évolution dans le temps ?

⁴ Avec une exception pour le forage d'Adabere, de 44m de profondeur, avec 2.68 mg/l de Fe

Et enfin : dans quels contextes physico-chimique (pH, conductivité), d'exploitation (débit, rabattement, vitesses de l'eau dans les crépines, ...) ?

1b / L'identification des « besoins en traitement »

Cette identification relève également de questions « où ? » (Où se situent réellement les besoins en traitement ?) et « pourquoi ? » (Quelles sont les nuisances réelles liées au fer, et dans quelle mesure justifient-elles le traitement ?)

La première étape sera également une cartographie, celle des consommations actuelles, en distinguant les consommations à partir du réseau (eau potable au sens strict), et les autres consommations (besoins des troupeaux, prélèvements d'eau potable hors réseau), *pour lesquelles la concentration en fer n'engendre a priori pas d'inconvénients.*

La deuxième est encore le tracé d'une carte, celle des « besoins en traitement », qui résultera du croisement de la carte des concentrations en fer et de celle des consommations « réseau ».

On devrait ainsi pouvoir mettre en évidence des régions où, l'essentiel des prélèvements servant à l'alimentation des troupeaux, les besoins en traitement ne concerneront qu'une faible partie de la production, et d'autres (a priori dans la zone centrale plus peuplée et plus chargée en fer) où les besoins en traitement concerneront l'essentiel de la production et seront plus élevés en valeur absolue.

Ceci devrait permettre d'établir un premier classement distinguant des forages, ou des groupes de forages, ou une prise en main des problèmes dus au fer s'avérerait prioritaire. D'autres éléments, comme la population, l'âge du forage et l'état des installations, leur niveau de prise en main par l'ASUFOR, le type d'énergie disponible, etc..., pourront alors être introduits dans la réflexion.

A priori, le profil-type d'un captage « à besoins prioritaires » serait un forage récent, bien entretenu, à fort débit, desservant une population agglomérée importante avec une eau très chargée en fer, générant des nuisances importantes, et bénéficiant d'une ASUFOR compétente et dynamique...

Mais la réflexion pourrait déboucher sur bien d'autres perspectives.

Niveau 2 : l'approfondissement

Il est vraisemblable que l'inventaire, à lui seul, ne puisse apporter toutes les réponses souhaitées sur la caractérisation du phénomène, et encore moins sur les solutions à mettre en œuvre.

Il semble donc nécessaire d'envisager une poursuite du travail, idéalement par une mission de recherche (un chercheur à temps plein, profil thésard, avec l'aide ponctuelle d'un à deux techniciens), doté(s) des moyens suffisants pour :

1. enrichir le bagage de données en continuant certaines mesures de routine (programme à définir)

2. étudier de façon plus approfondie des cas-types à très forte et très faible concentration, si possible géographiquement proches⁵
3. préciser l'influence de l'aération de l'eau et de son stockage (étudier par exemple les conséquences d'une aération forcée par injection d'air par un compresseur dans le bas du réservoir, celle de la possible stratification dans le réservoir en fonction du temps de séjour)
4. étudier l'intérêt et la possibilité de modifier :
 - la gestion des pompes et de la distribution (en augmentant par exemple le temps de séjour après aération)
 - les captages eux-mêmes ; on citera d'une part l'intérêt que pourrait avoir une opération de régénération d'un forage avec traitement au chlore des crépines pour détruire les bactéries du fer, d'autre part celui d'une réflexion, assortie de mesures, sur la possibilité de relancer des captages du type « forage –puits », dans lesquels une aération naturelle s'effectue par la surface (et pourrait être artificiellement augmentée)
 - les réservoirs (augmentation de l'aération cf §3, tranche d'eau de décantation, modification de la forme permettant une meilleure gestion des dépôts,...)
 - les autres organes (compteurs) et la structure des réseaux
5. étudier l'incidence des différentes formules d'intervention envisageables (y compris le traitement complet de déferrisation⁶) sur le coût de l'eau

Ces éléments de recherche, fondamentaux à nos yeux, ne nécessiteraient pas de gros investissements. Ils ne sauraient cependant être exclusifs d'une approche plus hydrogéologique, tout aussi fondamentale, visant à explorer la possibilité d'obtenir des eaux moins chargées en fer en captant exclusivement des horizons qui le seraient moins...

Cette approche ne pourrait vraisemblablement pas se dispenser de la réalisation de quelques forages d'essai, ou plus exactement, de conférer à de futurs ouvrages prévus par ailleurs une vocation première de forage d'essai (avec des essais successifs lors de l'avancement du forage), avant de les transformer en ouvrages de production. Elle aurait un coût certainement plus conséquent, mais encore largement justifié par l'amélioration des connaissances qu'elle permettrait non seulement sur le problème du fer, mais aussi sur l'aquifère maestrichtien en général, ressource en eau stratégique du Sénégal.

⁵ Reprendre par exemple les contacts avec la SONED pour essayer de comprendre pourquoi la concentration en fer est différente (facteur 5) dans les deux forages de Matam, distants de 100m et captant (**presque...**) les mêmes horizons

⁶ En se basant au départ sur le travail réalisé par AQUASSISTANCE sur le forage de Sinthiou Garba

Niveau 3 : la conception et la mise en place d'installations « pilotes »

Les étapes précédentes devraient permettre de sélectionner des situations où pourraient être mis en place des installations « pilotes ». Dans notre esprit, il pourrait s'agir de petites installations permettant de tester en vraie grandeur, d'une part l'efficacité de dispositifs de sophistication croissante, d'autre part les conditions de prise en main par l'ASUFOR et de bonne gestion des installations.

La réflexion pourrait ainsi concerner :

- la modification d'un château d'eau (ou la mise en service d'un modèle adapté), si l'étape précédente en a démontré l'intérêt
- l'intercalation, entre la pompe du forage et le château d'eau, d'un étage « au sol » consistant d'une simple aération et d'un dispositif de décantation, avec reprise vers le château d'eau,
- une installation du même type assortie d'une filtration (type station SONEDE de Matam),
- une installation plus complète, comme celle proposée par AQUASSISTANCE à Sinthiou Garba, avec filtration biologique et filtration sous pression (maintien d'un seul étage de pompage).