
La qualité de l'eau au cœur des performances dans les périmètres irrigués du delta ? Étude de cas de la cuvette de Pont-Gendarme

L'espace rizicole est structuré par les aménagements hydroagricoles (station de pompage et de drainage, canaux d'irrigation et de drainage) et les rizières. Aussi, la qualité des eaux dans les canaux d'irrigation est un indicateur essentiel pour comprendre les résultats des rizières en termes de productivité et de dégradation des sols.

Ce chapitre est articulé en deux parties : une première partie présente la cuvette de Pont-Gendarme et la « naturalité » de la salinité résultant de l'ensemble des transgressions et régressions marines du Quaternaire. La seconde partie analyse le résultat des campagnes de mesures effectuées dans la cuvette de Pont-Gendarme de décembre 2012 à avril 2013.

1. La salinisation primaire et secondaire dans le delta et la cuvette de Pont-Gendarme

La salinisation des sols est un phénomène naturel dans le delta du Sénégal. Elle est particulièrement marquante dans certaines cuvettes agricoles. L'introduction de la riziculture depuis 1960 et les apports d'eau douce depuis le fleuve Sénégal ont fondamentalement modifié les relations entre l'eau du fleuve, la nappe phréatique et les terres rizicultivables du delta.

1.1. La problématique des eaux salées dans le delta du Sénégal

Dans le delta du Sénégal, la salinité primaire des terres et des eaux souterraines est au cœur des investissements hydrauliques (barrage antisel de Diama, canaux de drainage des eaux usées agricoles et le nouveau schéma hydraulique). La qualité de l'eau est donc une question préoccupante. Elle recouvre à la fois la sécurité alimentaire (productivité agricole et qualité de la production mise sur le marché national ou international), la dégradation des sols (absence de drainage ou mauvais planage des sols) et des eaux (interactions entre les eaux souterraines salées et les eaux de surface douces). La maîtrise de l'eau recouvre donc une dimension quantitative (barrages et ouvrages hydrauliques), mais aussi qualitative.

Le développement des plantes d'eau douce dans le delta, autant dans les chenaux d'amenée que dans les canaux d'irrigation et de drainage, est un autre versant de la problématique de la qualité des eaux d'irrigation. Ces plantes aquatiques, tout en réduisant l'hydraulicité des cours d'eau, ont un impact sur la qualité de l'eau encore peu connu dans le delta du Sénégal. Les méthodes de lutte contre ces plantes, dans les périmètres irrigués agricoles, renforcent les incertitudes (mis à feu des plantes dans les canaux avant irrigation, méthode chimique consistant à appliquer des herbicides dans les canaux enherbés).

La qualité de l'eau est donc au cœur des préoccupations en termes de santé humaine et animale (produits chimiques rejetés par l'agriculture moderne et les agro-industries et leurs impacts sur le milieu physique et la santé), de productivité agricole. Le changement des milieux naturels dépend aussi de l'évacuation des eaux usées agricoles dans le fleuve ou dans des dépressions naturelles (dégradation des sols, renforcement de la susceptibilité par rapport à la désertification, réduction des terres rizicultivables, etc.). Il existe plusieurs influences de la salinité des eaux d'irrigation sur les propriétés physiques du sol : tendance à la dispersion des argiles, dégradation de la structure du sol, perte de perméabilité, asphyxie des plantes (GOUAÏDIA *et al.*, 2012).

Le delta du Sénégal est localisé dans un espace semi-aride où la capacité évaporatoire de l'atmosphère est relativement élevée (température moyenne diurne d'environ 32° et nocturne de 20° dans la station de Saint-Louis) permettant le dépôt de sels (efflorescence saline) dans le contexte d'un environnement pédologique initialement salé et d'une nappe phréatique affleurante à subaffleurante dont le niveau de salinité est proche de celui de la mer à l'exception de quelques zones estuariennes. Les eaux de surface sont les principales ressources exploitées dans le delta du Sénégal. Cette situation est la conséquence d'une nappe globalement salée. Les zones où la salinité est faible sont, d'une part, la zone ferlienne (sud du lac de Guiers) et, d'autre part, la zone des Gandiolais dans les nappes du Continental Terminal (cf. Fig. 17). Les aquifères sont exploités par des systèmes de puits, de céanes (puisards, surcreusement de bas-fonds pour exploiter l'eau des nappes situées à faible profondeur) et de forages modernes. Dans ce cadre, la zone du Gandiolais a été largement impactée par l'ouverture d'une brèche sur la langue de Barbarie qui a contribué à une relative salinisation des nappes et à un recul des surfaces agricoles (salinisation des terres) se traduisant par une migration urbaine nationale et une émigration internationale.

Les apports d'eau de surface doivent être suffisamment contrôlés pour éviter la dégradation des sols, la réduction voire la perte de productivité agricole et leurs conséquences (abandon de parcelles agricoles). Dans ce cadre, une attention particulière doit être accordée à la qualité des eaux d'irrigation alors que le drainage des parcelles n'est pas encore un processus généralisé dans les pratiques agricoles dans le delta du Sénégal (notamment dans les périmètres irrigués villageois privés dont les aménagements sont relativement sommaires). Dans une étude récente, Cissé (2011) a montré, dans le périmètre de Boundoum, le rôle positif du dessalement des sols de périmètres à l'aide d'un système de drainage superficiel et son impact positif sur le développement végétatif du riz.

Cette situation rend nécessaire un suivi qualitatif des paramètres physico-chimiques et biologiques liés à la qualité des eaux d'irrigation, mais aussi à l'évacuation des eaux usées agricoles dans le cadre des interactions complexes entre eaux usées agricoles, nappes phréatiques, pédologie et eaux de surface douce.

Dans le cadre de cette thèse, un suivi sur une campagne agricole de l'évolution de la qualité de l'eau (indicateurs de conductivité et de température de l'eau) dans le périmètre de Pont-Gendarme est proposé. Ce travail contribue à une meilleure connaissance de ces interactions complexes dont un suivi continu et régulier devra être assuré par les services compétents (SAED, OLAG, Unions agricoles). Ce suivi de la qualité peut être considéré au plan méthodologique comme une partie intégrante de la Gestion Intégrée des Ressources en Eau dans le delta du Sénégal.

1.2. Des études sur la qualité de l'eau encore insuffisantes

Les travaux qui ont été faits relèvent de quatre domaines.

Le premier concerne le fleuve Sénégal et les travaux sur les apports dissous d'origine continentale (KANE, 1986, 1997). Cette étude montre une variation saisonnière de la conductivité, entre la période de crue et de décrue en amont du barrage de Diama ; les valeurs étant globalement très faibles (entre 0,05 et 0,54 $\mu\text{s}/\text{cm}$).

Le second a trait à l'acidité des sols sous irrigation (Pont-Gendarme, Savoigne) à travers les travaux de POUSSIN et *al.* (2002) ou, plus éloigné, la thèse de Diène ROKHAYA (1998) sur *Riziculture et dégradation des sols en vallée du fleuve Sénégal : analyse comparée des fonctionnements hydrosalins des sols du delta et de la moyenne vallée en simple et double riziculture.*

Cette thèse analyse, globalement, la question de la salinité des terres du delta en termes de risque et de vulnérabilité dans les sites de Ndiaye. L'une de ses conclusions est que, si la riziculture intensifie le problème d'engorgement (saturation en eau de terres agricoles), la double riziculture (il s'agit de la pratique d'une double culture de riz : en contre-saison chaude et en hivernage), elle, favorise l'évacuation de grandes quantités de sels dans les périmètres irrigués. Ce travail souligne l'importance d'un suivi de la qualité de l'eau utilisée pour l'irrigation par le biais du Lampsar ou du fleuve Sénégal. Dans ce cadre, la pratique de l'irrigation ne contribue pas, directement, à la dégradation des sols.

Le troisième domaine concerne les travaux sur les eaux de drainage dans le delta du Sénégal, notamment la thèse de CISSÉ (2011) qui montre que les eaux d'irrigation sont de bonne qualité alors que les eaux de drainage agricole sont très chargées en substances chimiques d'origine diverse (CISSÉ, 2011 ; cf. ; aussi les travaux de LOYER (1989) sur *Les sols salés de la basse vallée du fleuve Sénégal. Caractérisation, distribution et évolution sous cultures*). Il s'agit de l'un des travaux principaux qui analysent la salinité « naturelle » des terres du delta et celles sous influence anthropique (riziculture submergée).

L'étude de LOYER (1989) a été faite dans les premières années de mise en exploitation du barrage de Diama (1987) et de riziculture irriguée dans la vallée du Lampsar (1980). Cette étude présente un ensemble de résultats sur :

- la salure présente dans les sols, d'origine marine ou lagunaire, essentiellement sodique ou magnésienne, à laquelle peut se superposer une alcalisation liée à la sodicité excessive ;
- le dessalement satisfaisant dans les parcelles ; l'irrigation contribuant à la déssalinisation des sols ;
- l'état hydrologique de la nappe ; après la mise en eau des parcelles, la nappe remonte de 20 à 50 cm entre 10 et 30 jours ; ce niveau se maintient, avec de faibles oscillations, pendant toute la durée du cycle agricole. En fin de cycle, la vidange des parcelles produit l'effet inverse, c'est-à-dire une baisse rapide du niveau de la nappe phréatique pendant deux semaines, puis une baisse plus lente pour retrouver sensiblement son niveau initial ;
- l'impact positif de la riziculture irriguée, laquelle, après cinq ans, a contribué au dessalement de la nappe phréatique (dans sa tranche superficielle).

Les effets positifs de la riziculture submergée dans le lessivage de l'acidité dans le sous-sol (DECKERS et al., 1996) ou des terres salées des périmètres irrigués ont été confirmés dans le périmètre de Boundoum (CISSÉ, 2011) à partir de l'application d'une grande quantité d'eau d'irrigation (18 000 m³/ha). Ces études montrent donc l'effet positif de la riziculture sur l'acidité et la salinité des cuvettes du delta du Sénégal, mais encore faudrait-il que l'eau d'irrigation soit de faible minéralisation ou n'ait pas été contaminée localement ou très localement par une remontée capillaire de salinité.

Notre étude se positionne autour de ces enjeux d'autant que les autres études mettent en avant soit la dimension verticale des interactions entre les eaux d'irrigation et la nappe phréatique, la parcelle irriguée servant d'interface (LOYER, 1989), soit la qualité des eaux usées dans les dépressions de drainage (CISSÉ, 2011). La dynamique des flux dans les canaux d'irrigation est peu abordée. Nous essayerons de l'envisager dans ce travail.

Le quatrième domaine fait référence aux travaux sur la qualité des eaux d'irrigation. SÈYE (2005) a, ainsi, effectué des relevés de paramètres physico-chimiques (pH, conductivité électrique, température) entre la Taouey, la prise d'eau, le canal secondaire, la lame d'eau de la rizière et le drain. La cuvette expérimentale n'a pas été précisée dans l'étude. De même, la mesure unique (10/06/2005) ne permet pas de faire une analyse comparative dans le temps. Sur le plan spatial, ce travail montre qu'entre la source de prélèvement (fleuve) et le canal d'irrigation, la conductivité est presque constante (env. 72 µS/cm). Dans la rizière (1 267 µS/cm)

et dans le drain d'évacuation (754 $\mu\text{S}/\text{cm}$), la conductivité électrique devient très importante. Dans ce cadre, l'affleurement de la nappe salée (4 402 $\mu\text{S}/\text{cm}$) a des influences sur la qualité de l'eau dans la rizière.

Dans ces travaux, il manque autant la dimension spatiale, et une étude à une échelle fine, entre le fleuve (point de prélèvement) et le point le plus éloigné de ce dernier, que la dimension temporelle (diachronie et approches comparatives). En outre, ces analyses sont axées sur l'influence de l'irrigation sur la dégradation des sols. Sans nier l'importance de cette question, il apparaît que la qualité de l'eau distribuée en amont (eau d'irrigation acheminée à partir d'un ensemble de canaux) est une dimension tout aussi essentielle que la dégradation des sols dans les parcelles. Le travail suivant est donc axé sur cet aspect des choses qui vient compléter ces études souvent anciennes.

1.3.. La cuvette de Pont-Gendarme au cœur de la question des eaux usées agricoles

La cuvette de Pont-Gendarme est un aménagement transféré, situé dans le bas delta du Sénégal. Elle se situe entre la cuvette de Thilène au nord, le périmètre de Ngomène au sud, la vallée du Lampsar à l'ouest et la dépression du Noar au sud-est. La cuvette de Pont-Gendarme polarise un ensemble de villages ethnostructureaux :

- *Peuls* du *Diéri* : Gandiaye, Roum, Odabé Alwathiam, Médina, Assitoye ;
- *Wolofs* de la zone inondable du *Waal*o : Pont-Gendarme, Noar et, dans une moindre mesure, Thilène.

Ces villages sont organisés en Groupement d'Intérêt Économique (GIE) au nombre de seize (Tableau 39). L'affectation des parcelles irriguées au groupement correspond, dans la cuvette, aux mailles hydrauliques. Une maille hydraulique est un ensemble de périmètres irrigués appartenant à un même GIE. Ces dernières sont révélatrices des dynamiques anthropologiques locales qui seront étudiées dans le treizième chapitre de cette thèse.

Tableau 39 : Superficies aménagées et cultivées dans la cuvette de Pont-Gendarme (d'après Union des producteurs de Pont-Gendarme, 2013)

Nombre d'organisation de Producteurs	Superficie aménagée (ha)	Superficie exploitée (ha)	Superficie cultivée (contre-saison chaude ; ha)	Spéculations (par ordre d'importance)
16	291	291	211 (taux de mise en valeur de 72,5 %)	Riz, oignon, tomate, gombo, aubergine, chou, concombre, carotte

La campagne de contre-saison froide a concerné 141 ha en production de diversification (81 financés par la CNCAS, 60 par d'autres bailleurs). La production de riz de contre-saison chaude (février) concerne 70 ha, soit 211 ha mis en valeur durant la contre-saison (froide et chaude). 10 ha n'ont pas été mis en valeur à cause de la salinité des sols. Ces parcelles sont dispersées dans la cuvette de Pont-Gendarme (Fig. 80).

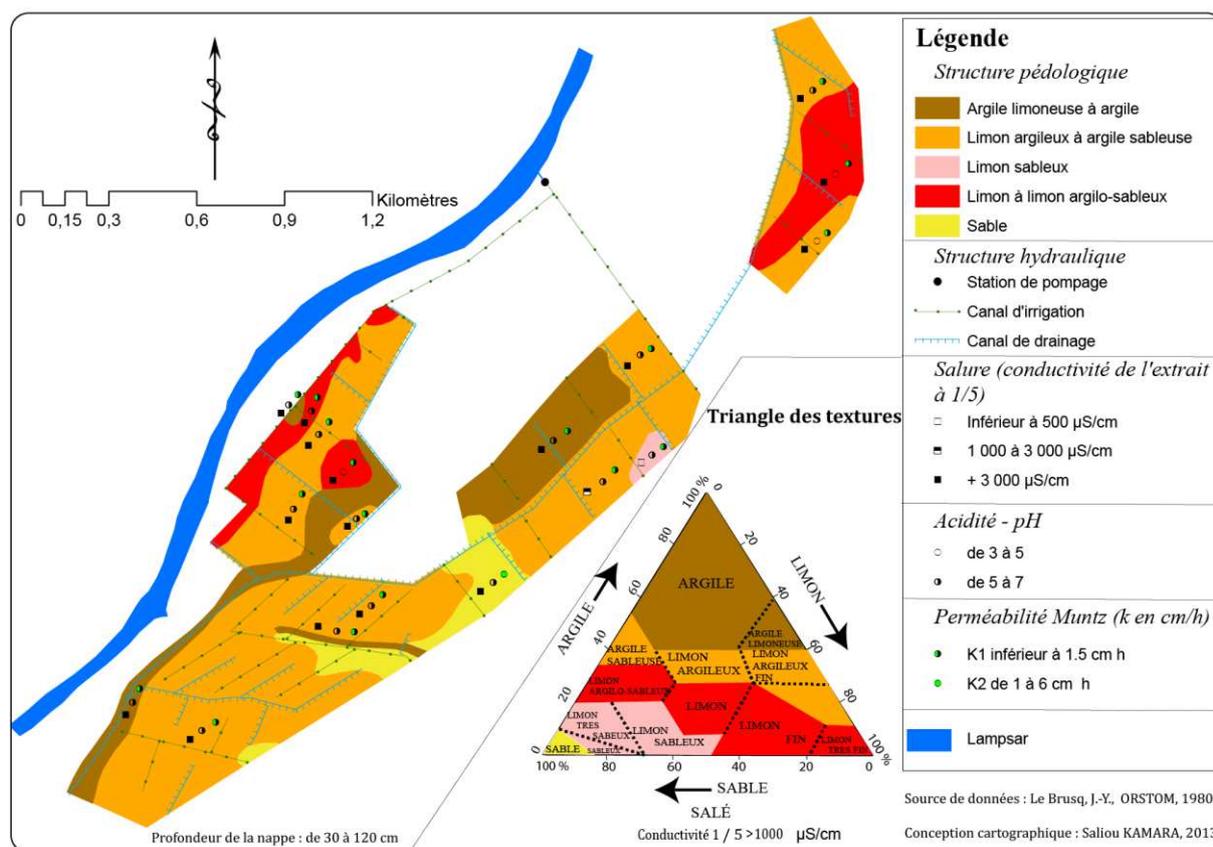
La figure 79 donne une idée de la structure pédologique de la cuvette de Pont-Gendarme, en situation naturelle, ainsi que sur l'influence potentielle de la salinité et de l'acidité des terres. Les données datent de 1980 et coïncident avec l'introduction progressive de la riziculture irriguée submergée dans le delta du Sénégal depuis 1960 en fonction des différents stades de maîtrise de l'eau. En tout état de cause, la texture des sols est argileuse.

Sur le plan de la minéralisation, la cuvette est marquée par la présence de sols salés ; la conductivité étant supérieure ou égale à 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à l'exception de la zone limono-sableuse où elle est inférieure à 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mais qui n'occupe qu'une partie marginale de la cuvette.

Le pH révèle l'acidité des sols de la cuvette de Pont-Gendarme alors que le coef. K (cm / heure) révèle un sol à la perméabilité satisfaisante (en termes d'infiltration de l'eau).

À ces paramètres, il faut ajouter le bilan hydrique des parcelles. Si on se base sur les travaux de SEYE (2005) sur la cuvette de Pont-Gendarme, sur une campagne d'hivernage, le taux d'infiltration par rapport aux apports (station de pompage + pluie efficace) est de 11 % et celui d'évapotranspiration (riz) d'environ 50 % ; la hauteur d'eau optimale pour le riz dans le delta est comprise entre de 5 à 10 cm durant les phases végétative et reproductive. Ainsi, l'infiltration est faible dans les cuvettes de décantation aux sols argileux et importante au niveau des berges du Lampsar (Fig. 79).

Figure 79 : Structure pédologique de la cuvette de Pont-Gendarme (d'après LE BRUSQ, ORSTOM, 1980)



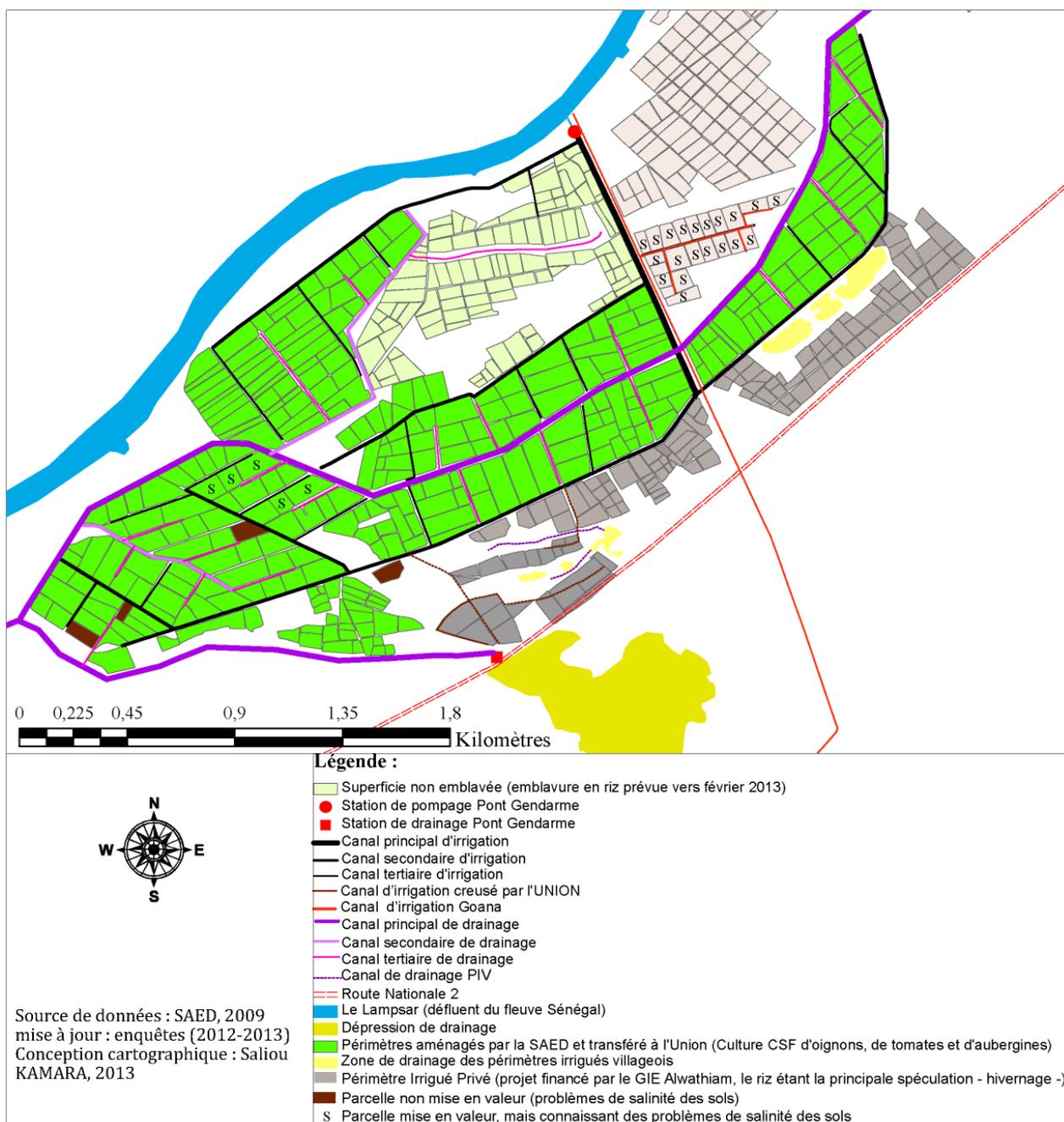
La campagne de contre-saison froide a démarré le 19 décembre 2012 pour une récolte au mois d'avril. Les rendements sont relativement bons dans la cuvette (8 à 11 t à l'hectare), à l'exception de crises hydriques (2008) durant laquelle le niveau très bas de l'eau dans la vallée du Lampsar (mai-juin) a entraîné une production moyenne de 2 à 4 t à l'hectare.

La cuvette dispose d'une station de pompage et d'une station de drainage (Fig. 80). Les caractéristiques de la station de pompage électrique sont les suivantes : débits (m^3/s) = 0,26 (soit une capacité journalière d'environ 22 500 m^3), cote minimum d'aspiration (m) = 0,10, cote de calage des échelles limnimétriques (m) = 0,038 en amont (fleuve) et 0,894 en aval (canal principal d'irrigation). Cette station a été mise en service en 1992 alors que la cuvette est irriguée depuis 1980, réhabilitée en 1990 et sa gestion transférée à l'Union de Pont-Gendarme en 1992.

Le canal principal d'irrigation cohabite avec un canal d'irrigation (canal GOANA) alimentant en eau un certain nombre de périmètres privés agricoles (Fig. 80).

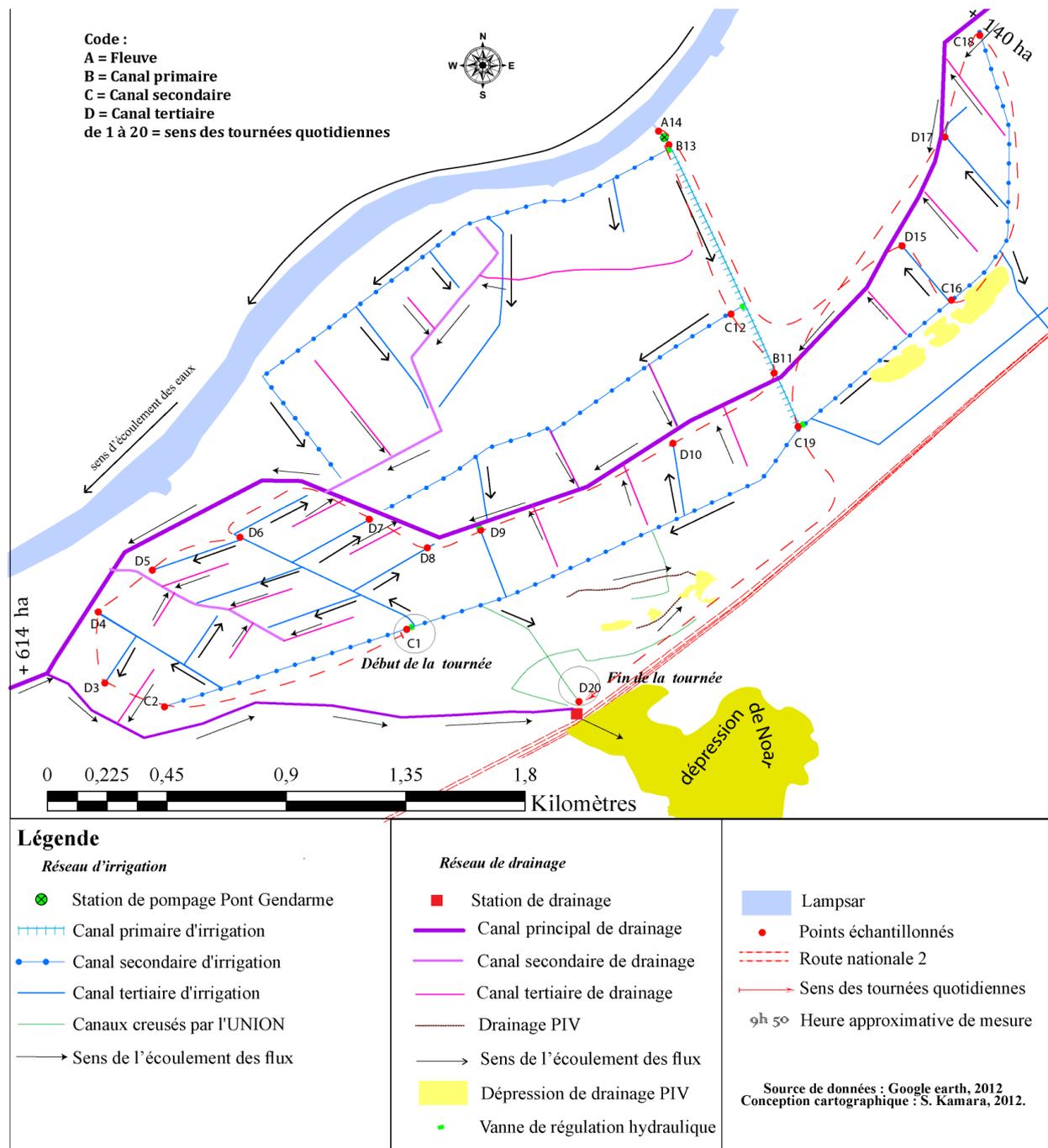
Les vannes de régulation hydraulique sont des martelières munies d'un panneau en métal. Elles ne fonctionnent pas comme un système secondaire de pompage (modèle de la cuvette de Thiagar) ; l'eau circulant, en tout point de la cuvette, par gravité. Ces vannes de régulation permettent de réguler l'eau d'irrigation sur certaines sections du canal secondaire d'irrigation pouvant entraîner une stagnation de l'eau en amont et/ou en aval.

Figure 80 : Structure spatiale du système hydroagricole de la cuvette de Pont-Gendarme (d'après SAED, 2009 ; mise à jour)



Le système d'irrigation est complété par un système de drainage permettant l'évacuation des eaux usées agricoles dans la dépression endoréique du Noar (Fig. 81). Dans la cuvette de Pont-Gendarme, l'évacuation des eaux usées agricoles est un élément de base à la fois de la qualité du milieu et de la qualité des eaux. Les périmètres irrigués villageois, qui correspondent aux aménagements en extension, sont entièrement réalisés par l'Union de Pont-Gendarme. Ces aménagements disposent de réseau d'irrigation, mais pas de réseau de drainage (Fig. 81).

Figure 81 : Structure spatiale du système hydraulique dans la cuvette de Pont-Gendarme (irrigation et drainage ; d'après données de Google Earth, 2012)



Dans ce système hydraulique « inachevé », les eaux drainées par les périmètres ont tendance à rester dans le système et à s'infiltrer (et donc à alimenter les eaux souterraines déjà salées, les risques de pollution étant non négligeables) ou à s'évaporer (concentration en sel). En tout état de cause, ces eaux « usées » dégradent les sols et, potentiellement, la qualité des eaux souterraines en raison aussi de l'utilisation d'engrais chimique dans les rizières. De même, les inondations à l'intérieur de la cuvette ont tendance à faire déborder les eaux de drainage dans les parcelles (cas en 2009), ce qui se traduit par une dégradation des sols (salinisation).

La dépression de Noar collecte les eaux de drainage d'un ensemble de 140 ha en amont et 614 ha en aval, auquel il faut ajouter les 270 ha de la cuvette de Pont-Gendarme. Le volume estimé d'eaux usées agricoles rejetées par an dans cette dépression est d'environ 3 100 000 m³. Cette eau chargée par les différents canaux de drainage et rejetée dans la dépression est perdue par évaporation (des sels étant déposés en surface) et par infiltration en alimentant la nappe et en rehaussant le niveau piézométrique (CISSÉ, 2008). Les études actuelles ne permettent pas de donner une proportion entre les eaux infiltrées et les eaux évaporées. Dans ce cadre, les travaux de CISSÉ (2011) ont montré que le drain du Noar¹ (Fig. 81) a l'un des niveaux de conductivité les plus élevés des dépressions de drainage du delta (à environ 5 500 μ s), juste derrière le Krankaye (près de 7 000 μ s). Cette minéralisation élevée des eaux de drainage est la combinaison du lessivage du substrat traversé par les eaux de drainage (salinité primaire des sols traversés), l'usage de fertilisants chimiques et de produits phytosanitaires utilisés dans la riziculture irriguée, etc. (CISSÉ, 2011). Cette situation est corroborée par la teneur élevée en nitrates qui peut entraîner, à long terme, l'eutrophisation des eaux dans des dépressions endoréiques telles que le Noar ; l'eutrophisation étant l'enrichissement de surface d'eau en éléments nutritifs favorisant la croissance des plantes, des algues et des bactéries (KAMARA, 2008).

Les relations sont complexes entre ces ensembles d'attributs spatiaux. Les impacts peuvent être perceptibles autant dans la dégradation de l'environnement que dans celle des structures socio-économiques (Fig. 82). Dans un hydrosystème semi-artificialisé aussi complexe que celui du delta du Sénégal, la croissance d'un problème environnemental peut être à l'origine de changements tant dans les structures spatiales que dans la structure sociale. En sus de cela, l'usage des eaux de drainage par les pêcheurs maliens est un élément à prendre en compte, car il introduit une dimension supplémentaire liée à la santé humaine (Fig. 82).

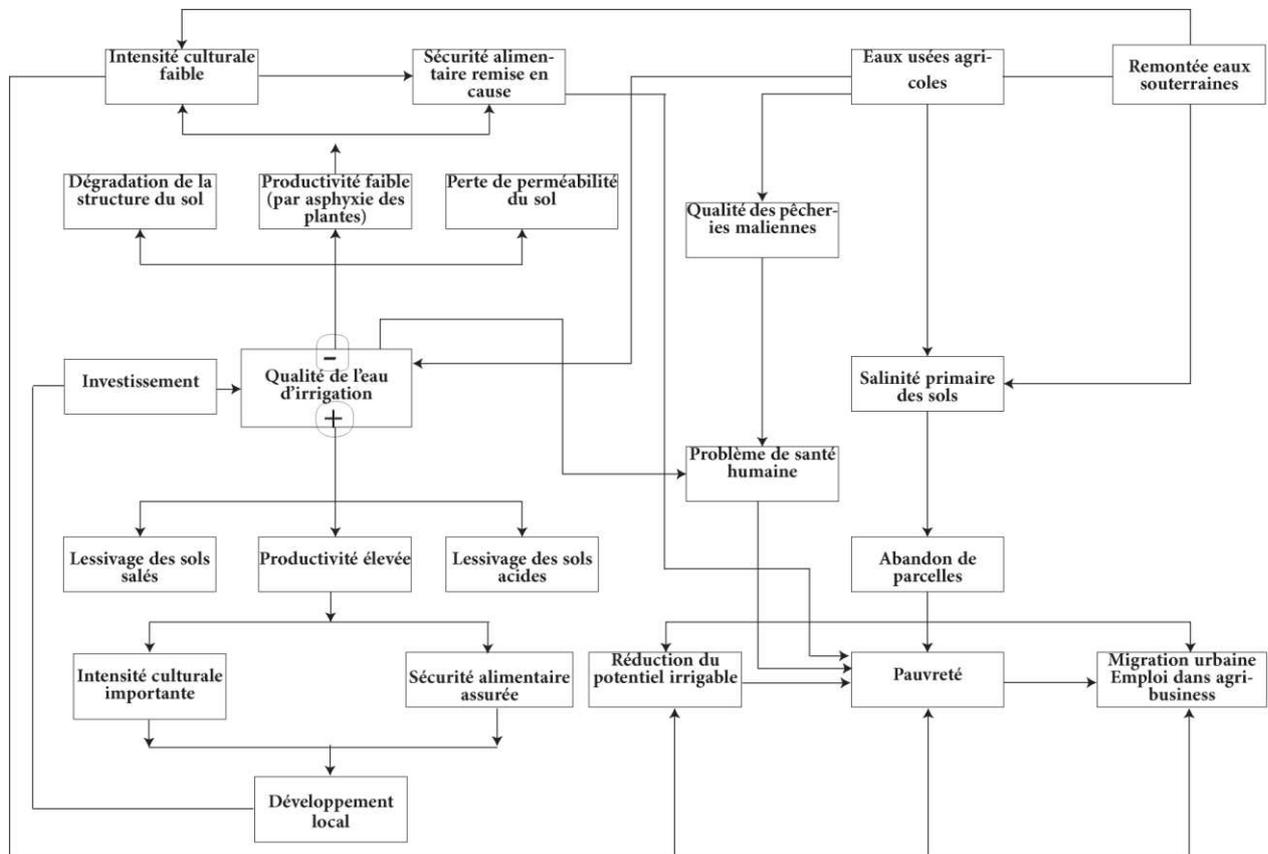
Ces relations systémiques décrites dans la figure 82 sont faites de boucles de rétroactions positive et négative. Ainsi, une bonne qualité des eaux d'irrigation est, à la fois, un facteur d'amélioration de la qualité des sols marqués par une salinité primaire (Fig. 82) et de productivité se traduisant par une bonne intensité culturale et à la lutte contre l'insécurité alimentaire et la pauvreté. En résumé, une bonne qualité de l'eau peut être un facteur de développement local.

À l'inverse, une eau d'irrigation de mauvaise qualité est un facteur important de dégradation des sols se traduisant par de faibles intensités culturales, la réduction de la fertilité des sols entraînant des situations d'abandons ou de faibles productions agricoles, mais aussi la réduction des investissements rizières (frein pour le développement local). La sécurité alimentaire et la

¹ Le Noar est un ancien marigot temporaire (alimenté par la crue du Lampsar) transformé, depuis les années 1980, en dépression de collecte des eaux de drainage de certains périmètres du delta du Sénégal. Dans la logique du nouveau schéma hydraulique du delta, des marigots permanents (le Djeuss) ou intermittents seront transformés en drain et de nouvelles sources d'alimentation en eau douce des parcelles (canal depuis l'amont du barrage de Diama) proposées. Ce choix révèle des inégalités sociales et ethniques dans l'espace. En effet, ce choix est motivé par des considérations démographiques (plus faible densité de population sur le Djeuss que sur l'axe Gorom-Lampsar) ou sociologiques (le Djeuss étant traditionnellement peuplé de *Maures* et de *Peuls*, éleveurs transhumants ayant un faible ancrage foncier et politique vs *Wolof* sur l'axe Gorom-Lampsar ayant une influence politique traditionnellement forte et un fort ancrage foncier dans le cadre de l'agriculture pluviale et sur berge) devant réduire les revendications foncières (DIA, 2012).

santé humaine pouvant subir les impacts de cette situation à travers les productions agricoles et halieutiques, dont la consommation dépasse le cadre strict du sous-bassin versant (delta Sénégal) et des frontières terrestres de l'État du Sénégal en impliquant, par exemple, le Mali.

Figure 82 : Exemple de relations systémiques complexes entre la qualité des eaux et les structures socio-économiques



Il est nécessaire d'avoir une gestion fine de ces paramètres, à différentes échelles (Unions Hydrauliques, SAED, OMVS, etc.) afin de ne pas basculer d'une boucle positive à une boucle négative. Ceci passe aussi par une étude exhaustive de la proportion d'eaux usées s'infiltrant ou s'évaporant pour mieux comprendre les impacts potentiels sur la qualité des eaux souterraines, une question qui n'a pu être traitée dans ce travail, d'autant plus que dans le cadre de la GIRE, le recyclage des eaux usées agricoles est un facteur essentiel de régulation de la demande. Il est donc important de connaître l'action de chaque paramètre sur l'équilibre du système.

Toutes ces dimensions peuvent avoir des incidences sur la qualité de l'eau ou du sol dont le phénomène de salinité est récurrent depuis l'hivernage 2008-2009.

Dans le cadre de la qualité de l'eau distribuée par les canaux d'irrigation, nous posons l'hypothèse qu'il existe une variation de la minéralisation de l'eau dans les périmètres irrigués, entre la station de pompage et le point le plus reculé du canal d'irrigation. Toute la question est donc de savoir si, tant pour la température que pour la minéralisation, la qualité de l'eau disponible localement est correcte pour une riziculture optimale en tout point des périmètres. Si tel n'est pas le cas alors, il faut pouvoir localiser les lieux à partir desquels un problème sérieux se pose. Ceci dans l'espoir de le résoudre soit par des apports plus importants d'eau du fleuve, soit par des intrants plus faibles, soit par de meilleures techniques culturales. Évidemment, l'arrivée de sels dans la cuvette de Pont-Gendarme peut poser un problème pour la nappe.

Encore faudrait-il connaître les taux d'infiltration, le rôle d'écran à l'infiltration qui peut jouer une croûte de sel, l'importance de l'évaporation, etc.

Cette étude est un moyen pour étudier la relation qui existe entre la qualité de l'eau, le rendement et l'accès aux ressources dans les aménagements hydroagricoles, d'amont en aval ; les résultats ouvrant des perspectives pour une étude plus fine de la qualité de l'eau (étendue à d'autres cuvettes, mesures en continu de plusieurs paramètres sur les canaux d'irrigation, de drainage, dans les rizières et dans les cuvettes de décharge).

2. Dégradation de la qualité, d'amont en aval, de l'eau d'irrigation dans la cuvette de Pont-Gendarme

Cette partie propose une analyse spatiotemporelle des campagnes de mesure sur la cuvette de Pont-Gendarme à partir d'une approche temporelle (chronologie) et spatiale (distance, etc.).

2.1. Qualité de l'eau d'irrigation dans la cuvette de Pont-Gendarme : perspective spatiotemporelle

La campagne de mesure s'est étalée du 26 décembre 2012 au 24 avril 2013, donc sur quatre mois. Huit tournées ont pu être effectuées les 26/12/2012, 09/01/2013, 30/01/2013, 13/02/2013, 28/02/2013, 20/03/2013, 10/04/2013 et 24/04/2013 (Tableau 40). Les mesures ont été réalisées toujours par le même opérateur en commençant au point C1 de la figure 81 le matin vers 10 h et en terminant au point D20 vers 14h (Fig. 81). Les points de mesure ont donc toujours été les mêmes, mais il est arrivé pour des raisons x ou y que les points D17, C18, C19 et n°D20 n'aient pu être échantillonnés les 26/12/2012, 09/01/2013, 30/01/2013 et 20/03/2013. Nous avons donc 8 campagnes de 151 mesures.

Toutes les mesures ont été faites avec le même matériel : un conductimètre de marque Hannah qui a une précision de $\pm 2\%$ pour la conductivité et de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ pour la température. Autant que possible les mesures ont été réalisées assez loin des berges et là où le courant était le plus fort (problème de stagnation des eaux et interaction avec les berges et les végétaux).

Toutes campagnes confondues les valeurs minimales, maximales et modes sont données dans le tableau 40 (T max, T min T mode C max C min C mode).

Tableau 40 : Valeurs minimales, maximales et modes de l'ensemble des mesures

	Max	Min	Mode
T en °C (8 campagnes)	26,8	16,3	21,0
C en $\mu\text{S}/\text{cm}$ (8 campagnes)	474,0	28,0	149,0

Le même tableau a été fait pour chaque tournée (Tableau 41 et 42).

L'écart de température entre le maximum et le minimum (Tableau 41) est faible pour les 2^e, 6^e et 8^e campagnes de mesures alors qu'il est important pour la 1^{ère} (7,5°) et l'avant-dernière campagne (5,7°).

Pour le cas de la conductivité (Tableau 42), l'écart est en dessous de 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour la 2^e, 3^e et 6^e campagne et supérieure à 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour les autres campagnes. Il atteint même 353 $\mu\text{S}/\text{cm}$ durant la 7^e campagne de mesure.

Tableau 41 : Valeurs minimales, maximales et modes de chaque campagne de mesure (température)

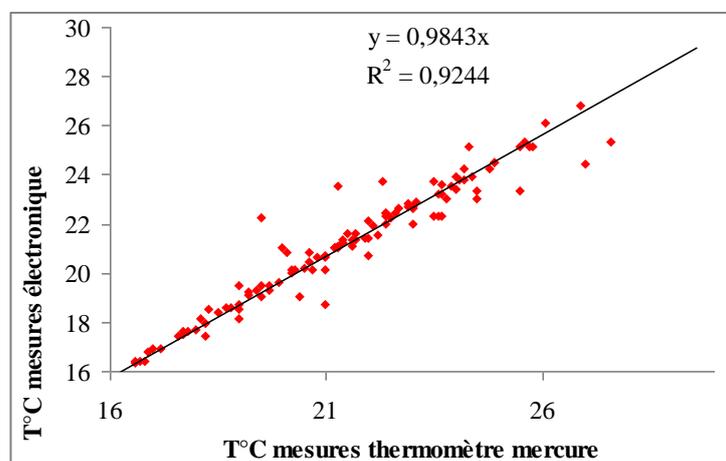
Nombre de mesures	T°C	Max	Min	Mode
16	T (le 26/12/2012)	26,6	19,1	21,0
19	T (le 09/01/2013)	19,1	16,3	16,4
19	T (le 30/01/2013)	22,2	17,7	19,3
20	T (le 13/02/2013)	23,6	20,1	21,0
20	T (le 28/02/2013)	25,1	20,1	21,3
17	T (le 20/03/2013)	25,3	22,3	23,8
20	T (le 10/04/2013)	26,8	21,1	22,4
20	T (le 24/04/2013)	26,1	23,8	25,0

Tableau 42 : Valeurs minimales, maximales et modes de chaque campagne de mesure (conductivité)

Nombre de mesures	Conductivité $\mu\text{S/cm}$	Max	Min	Mode
16	C (le 26/12/2013)	240	28	145
19	C (le 09/01/2013)	149	64	68
19	C (le 30/01/2013)	154	65	78
20	C (le 13/02/2013)	266	69	129
20	C (le 28/02/2013)	162	52	122
17	C (le 20/03/2013)	139	113	121
20	C (le 10/04/2013)	474	121	149
20	C (le 24/04/2013)	266	141	266

Afin de calibrer les mesures effectuées, nous avons pratiqué une double mesure de température, l'une avec un thermomètre au mercure précis au $1/10^{\circ}$ de degré et l'autre avec le thermomètre électronique ci-dessus décrit. Les résultats de cette double opération sont donnés dans la figure 83.

Figure 83 : Corrélation statistique entre la température mercure et la température électronique



De toute évidence il y a une très importante dispersion difficilement explicable, mais pas d'écart systématique. Les écarts de température entre le thermomètre au mercure et l'appareil vont jusqu'à 2°C pour certaines mesures (Fig. 83). La marge d'erreur reste donc assez importante pour la température de l'eau.

L'amplitude entre le minimum et le maximum mesuré est de 446 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour la conductivité et 10,5°C. Les valeurs maximales et minimales sont souvent observées en fin (max.) et début de tournée (min.). Ceci s'explique par un problème de temps : frais le matin, plus chaud plus tard. En effet, la température augmente de 5 à 10° entre 10h et 13h. Il aurait fallu pratiquer des mesures la nuit pour ne pas être soumis à l'insolation, mais cela pose d'autres problèmes.

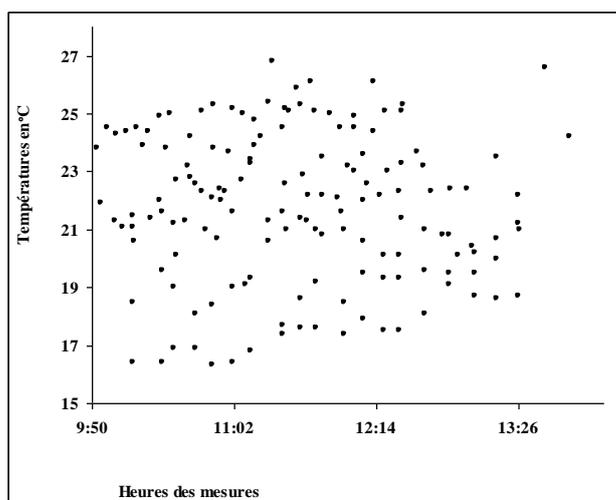
Les valeurs minimales de conductivité augmentent régulièrement entre la première et la dernière mesure, ce qui n'est pas le cas des valeurs maximales variables d'une tournée à une autre. Pour le cas de la température, si les valeurs maximales et minimales déclinent entre la première et la seconde tournée, elles croissent quasi constamment à partir de la troisième tournée. Cela correspond à une évolution du climat au cours de la saison végétative que celle-ci exploite d'ailleurs.

La mode révèle des valeurs de température et de conductivité électrique relativement basses dans la cuvette de Pont-Gendarme.

2.1.1. Approche chronologique

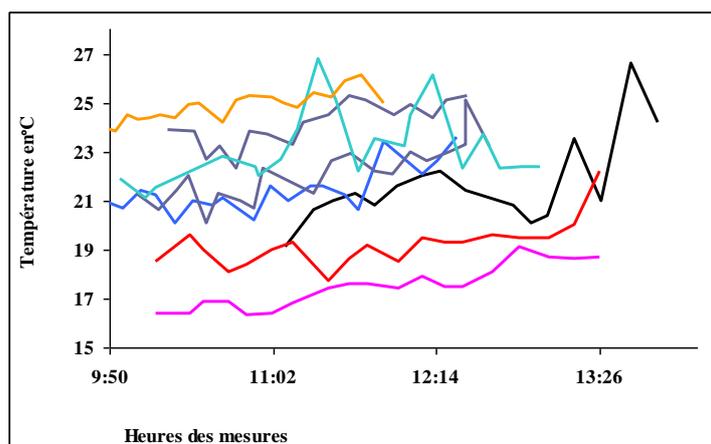
Les huit campagnes peuvent d'abord être envisagées sous un angle chronologique. Les tournées de terrain prenant entre 3 et 4h de temps et les eaux mesurées étant des eaux de surface exposées à un ensoleillement qui peut être fort, il est nécessaire de préciser les moments et les lieux des mesures. Celles-ci ont été réalisées entre 10h et 14h (Fig. 84). Cette solution n'est pas optimale en raison des apports par rayonnement solaire. Des mesures en tout début de journée (levé du soleil) ou en toute fin (coucher du soleil) seraient peut-être plus satisfaisantes. À moins d'avoir des mesures continues en différents points, ce qui permettrait de travailler en écarts en fonction de tranches horaires.

Figure 84 : Nuage de points de la température mesurée par rapport aux heures de mesures



Ainsi, les mesures des eaux les plus chaudes ont été systématiquement obtenues dans la seconde partie de la tournée (Fig. 85), mais il est clair aussi que la température relevée s'accroît, plus ou moins linéairement, tout au long de la tournée.

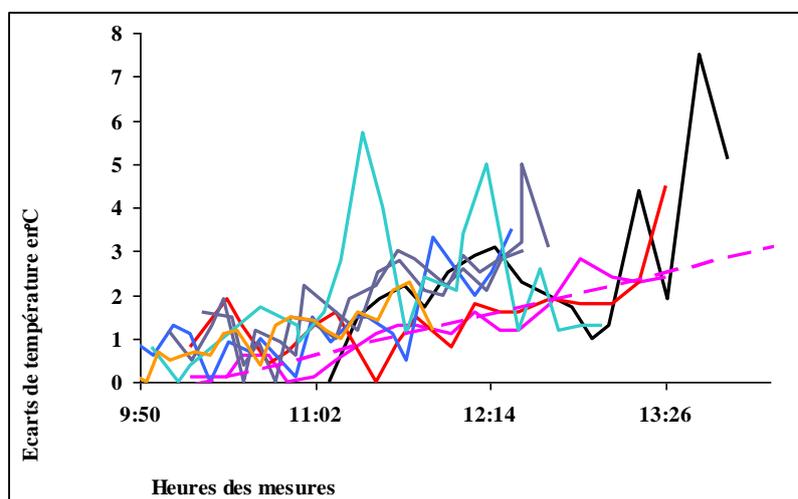
Figure 85 : Relations entre la température mesurée et les heures de mesures



Les tournées ont été effectuées en remontant le sens du courant (Fig. 86), donc de l'exhaure du périmètre irrigué à la station de pompage dans le drain principal (Lampsar). Ce choix est lié à l'impossibilité matérielle de faire des mesures synchrones dans les quinze ou vingt points suivis et aux possibilités d'accès du terrain.

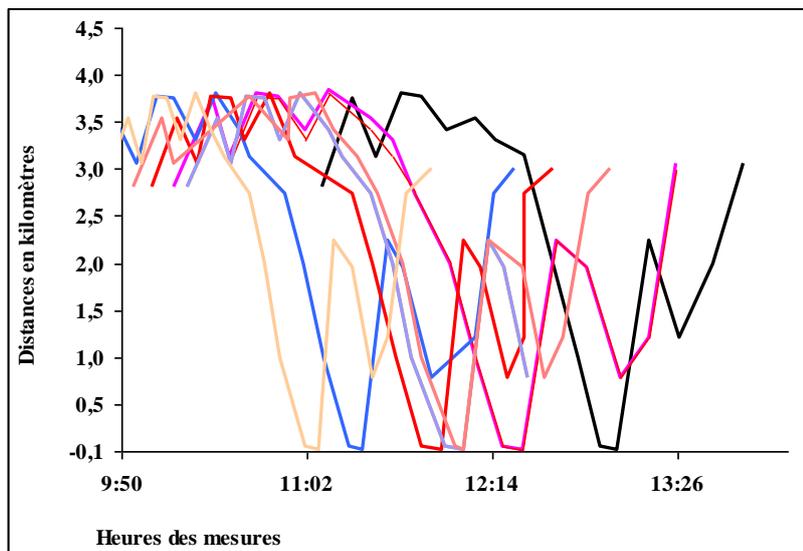
Mais ce choix conduit aussi à une limitation des effets thermiques. Une tournée dans le sens du courant aurait testé des eaux froides au départ et terminé à 14h sur des eaux très chaudes qui n'auraient vraisemblablement pas eu le temps d'être remplacées. À l'inverse, en remontant le cours, on peut espérer minimiser ce phénomène : les eaux périphériques et les eaux froides du matin et les eaux de fin de tournée, dont les eaux « fraîches » du drain principal. Malgré cela, on voit un accroissement des températures (Fig. 86).

Figure 86 : Écarts de température par rapport aux heures de mesure



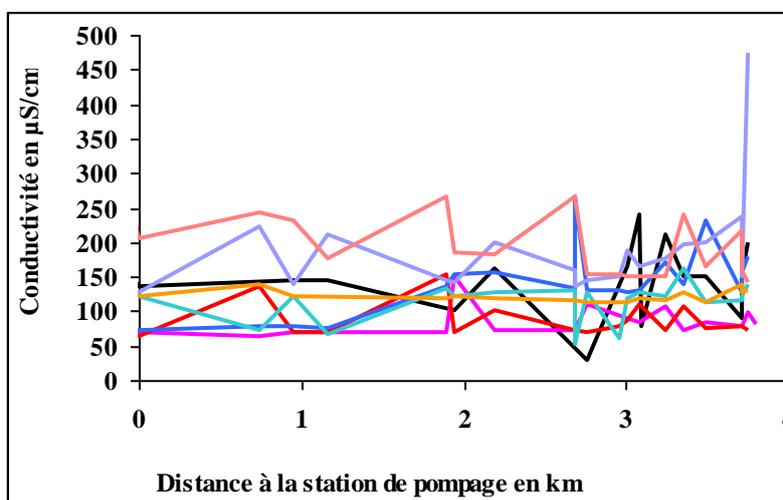
Par ailleurs, il n'a pas été toujours facile de passer au même endroit à la même heure comme le montre la figure 87. Ceci induit aussi un biais notable dans les mesures dont il faudra tenir compte. S'il est plus que probable que ces conditions de mesure jouent un grand rôle pour la température, il semble plutôt qu'en raison des cinétiques des réactions chimiques, ces biais sont moins sensibles sur la minéralisation comme le montre la figure 87 pour laquelle aucune tendance nette n'est visible en fonction du temps. Tout ceci indique tout de même que le protocole retenu en fonction des moyens disponibles est largement perfectible.

Figure 87 : Rapports entre la distance (en kilomètre) et les heures de mesures par rapport à la station de pompage (température et conductivité électrique)



Au contraire de la température donc, la conductivité n'évolue pas tout au long de la journée (Fig. 88). L'évolution de la conductivité électrique est irrégulière (en dent de scie) tout au long de la tournée. La température n'a pas de relation directe apparente avec l'évolution de la conductivité électrique dans les canaux d'irrigation.

Figure 88 : Relations entre la conductivité électrique mesurée et les heures de mesures



Il est logique de penser trouver un accroissement de la température en fonction de la distance à la station de pompage, donc à la prise d'eau dans la mesure où le tributaire prélevé est sensé disposer d'une masse considérable et d'un courant tel que l'inertie de ses variations devrait être plus faible, et donc présenter une eau plus fraîche (Fig. 88) en rapport avec celle du fleuve lui-même. Autrement dit, en fonction de la vitesse du courant et de la rapidité de la tournée, une eau pompée au début de la tournée a dû être mesurée, mais sans que l'on sache où ni quand, à un moment « médian » de la tournée.

Or les mesures faites en début de tournée qui correspondent à des eaux qui ont séjourné dans le système hydraulique et qui se sont mises plus ou moins à l'équilibre thermique avec l'air ambiant de la nuit et du matin, sont elles aussi relativement fraîches.

La température la plus fraîche mesurée n'est donc pas toujours celle de l'eau de la station de pompage. De même la concentration la plus faible n'est pas toujours celle de début de réseau.

Ceci pose un gros problème qui peut s'expliquer par le phénomène de renouvellement des eaux dans le canal primaire d'irrigation. Ainsi, dans le cas de la sixième tournée, entre 10h 16 et 11h 39, l'eau a peut-être pu se renouveler sur le canal principal, ce qui expliquerait les écarts de conductivité entre le canal principal et les canaux secondaires ou tertiaires. La station de pompage démarre le matin, à partir de 7h pour être arrêtée le soir à 18h. Aussi, 2h de temps sépare la première mesure de la treizième mesure. La station de pompage a fonctionné à son débit maximum. L'écoulement des eaux et, simultanément, l'irrigation des périmètres sont donc à la base de ce renouvellement, mélange des eaux douces dans les canaux d'irrigation.

Pour surmonter ce problème, il aurait fallu que le pompage soit arrêté pendant la durée de la tournée, mais cela ne résoudrait pas le problème du temps de séjour. L'eau est en écoulement (renouvellement) permanent (du moins sur le canal principal). Cela y exclut un problème de stagnation alors que dans les canaux secondaires, les régulations hydrauliques peuvent faire alterner une stagnation et un renouvellement des eaux. En effet, depuis le premier mars 2013 (début de la campagne de contre-saison chaude), la station de pompage fonctionne à l'optimum (mise en marche à 23h, arrêt à 18h). Ainsi la station de pompage a fonctionné au moins 11 heures de temps avant les premiers prélèvements.

Ce problème a été plus ou moins contourné lors de la septième tournée. En effet, la station de pompage a été arrêtée la veille, à 18h (Fig. 89). Durant la dernière tournée, la station de pompage a été mise en service le matin à 7h. Toutefois, une coupure d'électricité a été constatée vers 10h (à peu près au moment où les mesures ont commencé). Jusqu'à la fin des mesures, l'électricité n'est pas revenue. De ce fait, on peut dire que l'eau qui a été mesurée dans les canaux d'irrigation correspond approximativement au même type. L'écoulement a été quasi nul durant les 3h de temps de la tournée.

Il apparaît ainsi, dans les figures 89 (température) et 90 (conductivité), que l'arrêt du pompage durant les tournées a très peu d'effets sur l'évolution de la température en fonction de la distance la plus proche de la station. Au contraire de la conductivité qui connaît certes des variations, mais sans dépasser la valeur initiale mesurée au niveau de la station de pompage. Notre hypothèse d'une variation de la conductivité de la station de pompage au point le plus éloigné n'est donc pas invalidée.

Figure 89 : Évolution de la température (7^e et 8^e tournée) en fonction de la distance

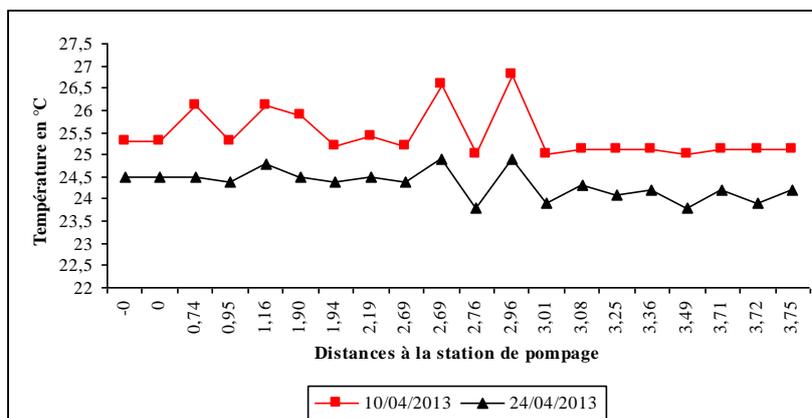
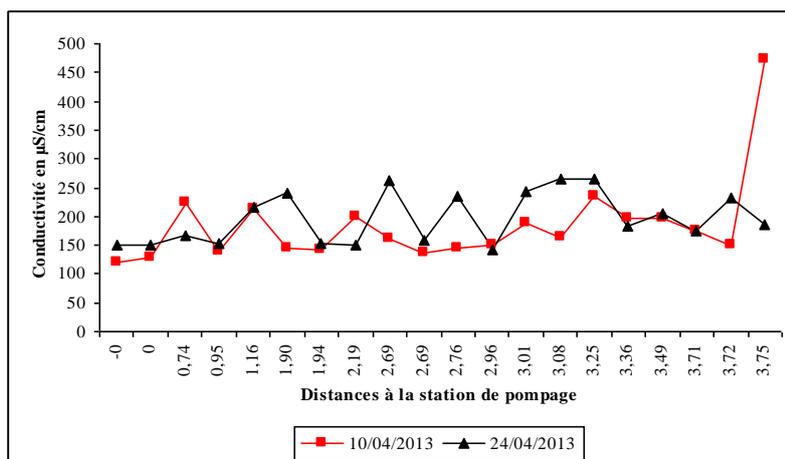
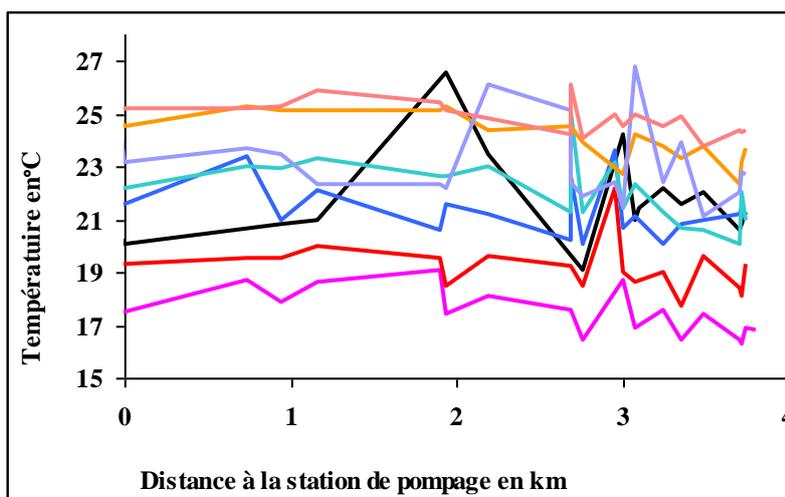


Figure 90 : Évolution de la conductivité (7^e et 8^e tournée) en fonction de la distance



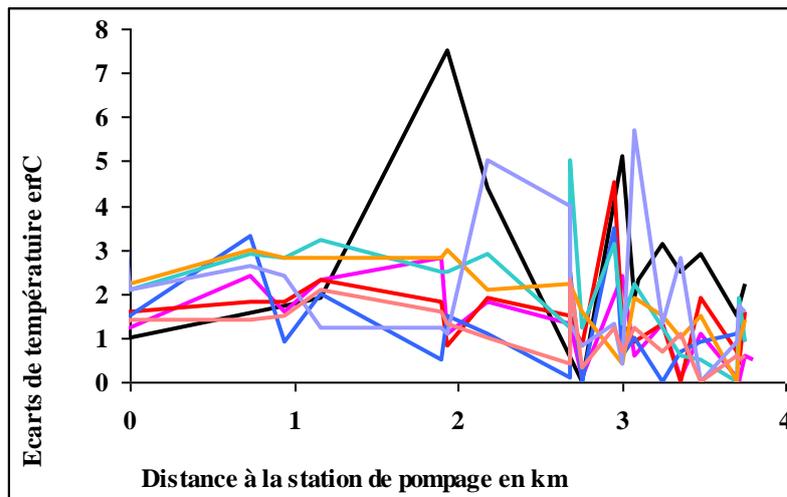
La figure 91 montre la température est très variable d'une tournée à une autre. Les figures 91, 92 (température) et 93 (conductivité) traduisent la variabilité de ces deux indicateurs en fonction de la distance.

Figure 91 : Évolution de la température en fonction de la distance



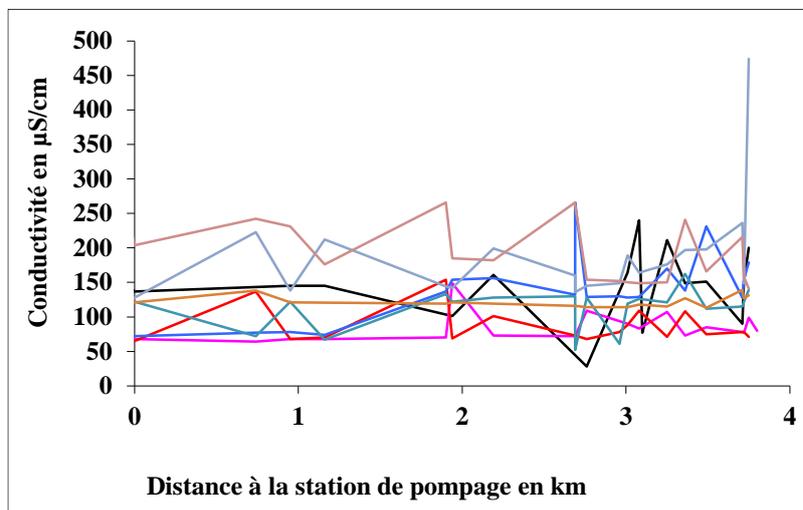
Globalement, nous avons donc deux types d'eau : une eau plutôt ancienne, mesurée en début de tournée, qui a séjourné dans le système d'irrigation et une eau plutôt récente mesurée en fin de tournée. Ceci conduit à un échantillonnage certainement plus large que si nous avions fait des mesures en suivant le cours d'eau.

Figure 92 : Écart de la température en fonction de la distance



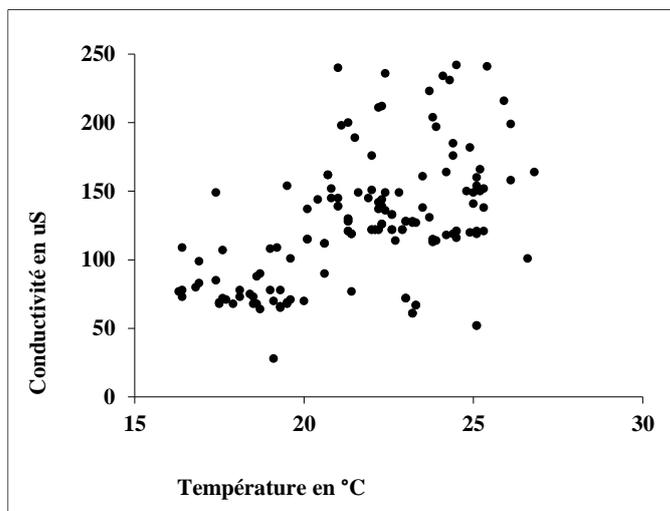
Il y a donc dans les résultats présentés ci-dessous une partie de l'information qui a trait à des variations en particulier de températures liées à des variations climatiques journalières et mensuelles et une autre qui dépend des heures des tournées et du cheminement lors de ces tournées ; les deux aspects ne pouvant ici être vraiment séparés, ce qui conduira à des conclusions prudentes appelant la mise en place d'un protocole bien plus lourd que cette première investigation si l'opération doit se poursuivre.

Figure 93 : Évolution de la conductivité électrique en fonction de la distance



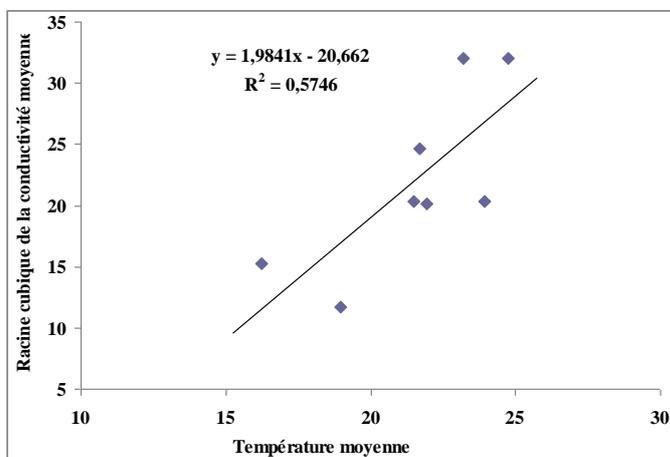
Il est par ailleurs attendu que le second indicateur relevé (la conductivité) soit moins sensible à l'influence climatique ; ce qui apporte un autre éclairage. Si tel devait être le cas, alors la relation entre valeurs de conductivité et valeurs de température devrait être mauvaise, ce que confirme bien la figure 94. Il n'y a pas de corrélation significative entre les valeurs mesurées de ces deux paramètres.

Figure 94 : Nuage de points des relations entre température et conductivité électrique mesurées



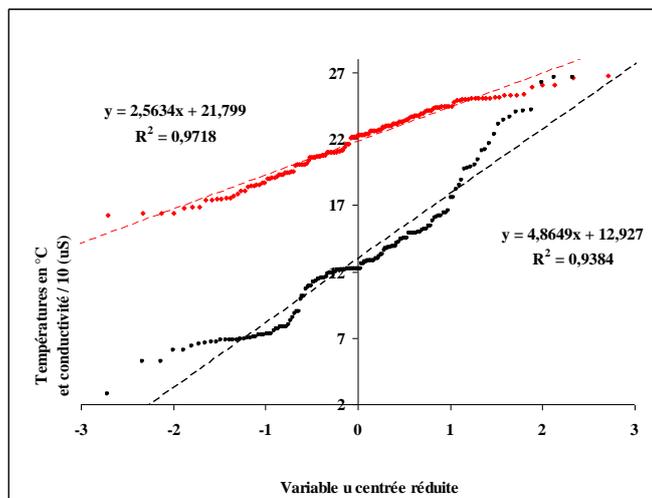
Toutefois, si on fait la moyenne dans les deux cas des mesures effectuées toujours aux mêmes points (Fig 95) la relation n'est pas si mauvaise que cela ($R^2 = 0,57$). La conductivité est donc globalement (en moyenne) plus forte lorsque la température est plus élevée et plus basse lorsque celle-ci est plus faible.

Figure 95 : Moyenne des points de mesures permanentes



Sur ces bases, il est toutefois possible de vérifier si les informations dont nous disposons correspondent à des distributions normales (Fig. 96). La valeur maximale relevée lors de septième tournée (474 $\mu\text{S}/\text{cm}$) du 10/04/2013 a été supprimée de la distribution. En effet, cette valeur est totalement hors du modèle gaussien et il est donc probable que c'est une erreur de mesure.

Figure 96 : Ajustements de lois de Henry sur les distributions de toutes les températures et conductivités mesurées lors des différentes campagnes

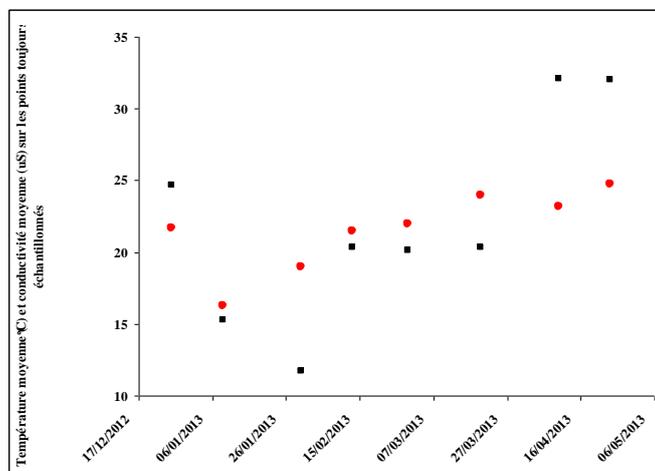


La figure 96 montre clairement qu'en particulier la distribution des températures est très largement normale. On relèvera vers + 2 à +3 sigma quelque chose qui ressemble à un plafonnement des valeurs maximales, tout comme vers -2 ou -3 sigma des valeurs en dessous desquelles l'eau ne semble pouvoir descendre.

Celle des conductivités est bien plus complexe avec une oscillation au niveau des valeurs négatives de u et quelques points qui s'éloignent vraiment du modèle, donc avec des queues de distribution qui ne sont pas gaussiennes.

Mais on peut à partir de cette normalité plus ou moins effective pour réfléchir en termes de moyenne pour chaque campagne (Fig. 97). Nous n'avons retenu pour cela que les points qui ont toujours pu être échantillonnés lors de toutes les tournées. Il apparaît alors une variation conjointe de la température moyenne et de la conductivité moyenne (divisée par cinq pour une mise à l'échelle sur le graphique) avec une baisse, pour les deux indicateurs, entre décembre et janvier puis une remontée en fin d'hiver.

Figure 97 : Température moyenne en °C des points toujours échantillonnés (points rouges) et conductivité moyenne (µS) mise à l'échelle (/5) des points toujours échantillonnés (carrés noirs)

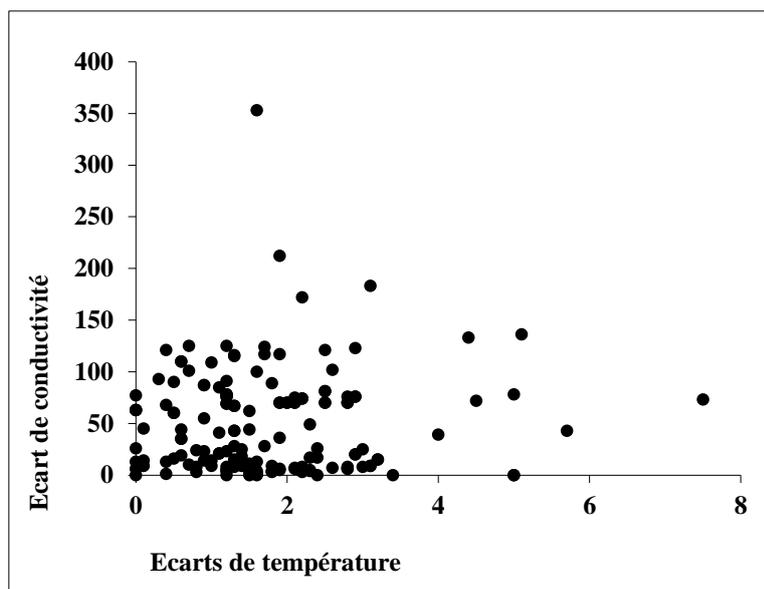


Nous avons là, en particulier pour la température un signal « climatique ».

Comme ce qui est en discussion ici c'est ce qui se passe dans le système d'irrigation, il convient de neutraliser cet effet en travaillant sur des écarts à la température la plus basse, mais aussi en traitant les écarts à la conductivité la plus basse qui a été relevée et qui n'est pas toujours celle des eaux du drain maître.

Tout comme avec les valeurs brutes de température et de conductivité, il apparaît que les écarts des mesures ne sont pas corrélés (Fig. 98). La figure 98 montre clairement que si l'on tient compte du temps il n'y a pas de relation statistique entre les écarts de température et les écarts de concentration ; comme si nous avions deux phénomènes totalement différents.

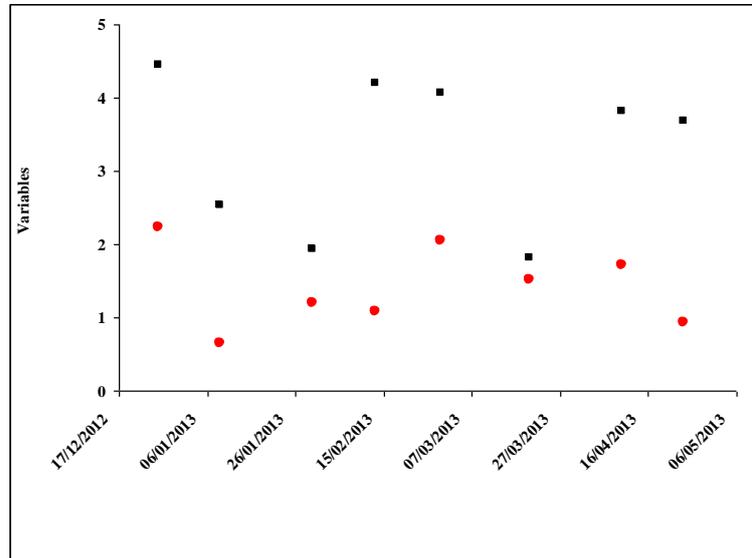
Figure 98 : Nuage de points des relations entre les écarts de température et les écarts de conductivité



À partir de là il est possible de voir comment se comportent les écarts moyens aux valeurs les plus faibles dans les deux cas (Fig. 99).

Dans la figure 99, il apparaît que les écarts de température et les écarts de conductivité se comportent très grossièrement dans le temps de la même façon à condition de procéder à une petite transformation des variables. Comme la température n'est grossièrement gaussienne (Fig. 96) que si l'on effectue une anamorphose de type logarithmique, nous avons calculé une moyenne sur le logarithme des températures puis pris l'exponentielle de ce résultat. De même comme la distribution de concentration n'est normale qu'en prenant la racine cubique des écarts (Fig. 96) nous avons calculé une moyenne avec les racines cubiques des valeurs puis élevé ce résultat au cube avant d'en prendre le logarithme pour être en correspondance d'échelle avec la température.

Figure 99 : Relation entre le logarithme népérien de la moyenne des racines cubiques des écarts de concentration élevée au cube et l'exponentielle de la moyenne des logarithmes népériens des écarts de température, les deux indicateurs étant calculés à partir de sites échantillonnés à chaque tournée

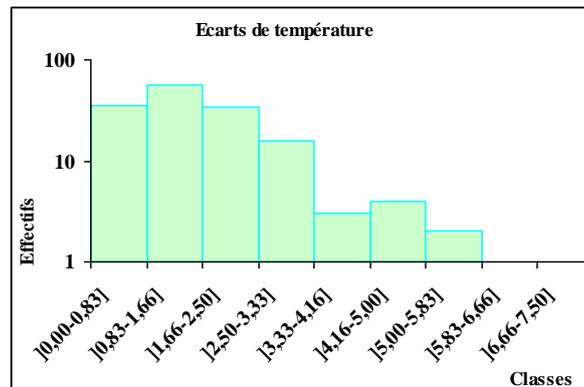


Sur ces bases, on retrouve une baisse entre décembre et janvier et une hausse ensuite, comme avec les valeurs brutes. Ceci indique que lorsque les valeurs sont hautes (de température et de conductivité) les écarts sont aussi forts, et inversement ; ce qui reste logique.

Cela étant ce qui nous intéresse, c'est avant tout la variabilité (et donc en partie la transformation) de la qualité de l'eau dans les drains. Par conséquent, la suite de l'analyse portera sur les écarts à ce qui peut être mesuré comme valeur minimale des deux indicateurs.

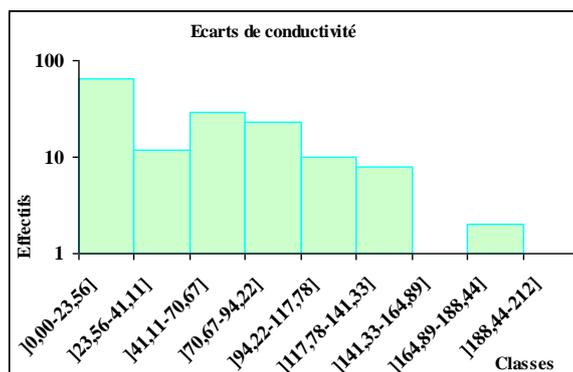
Pour rendre compte de cela, nous avons réalisé les deux histogrammes des séries dérivées en fonction de 9 classes modales (Fig. 100 et 101).

Figure 100 : Classes modales des écarts de températures



Il apparaît clairement que la série T°C est dissymétrique, ce qui justifie l'anamorphose logarithmique.

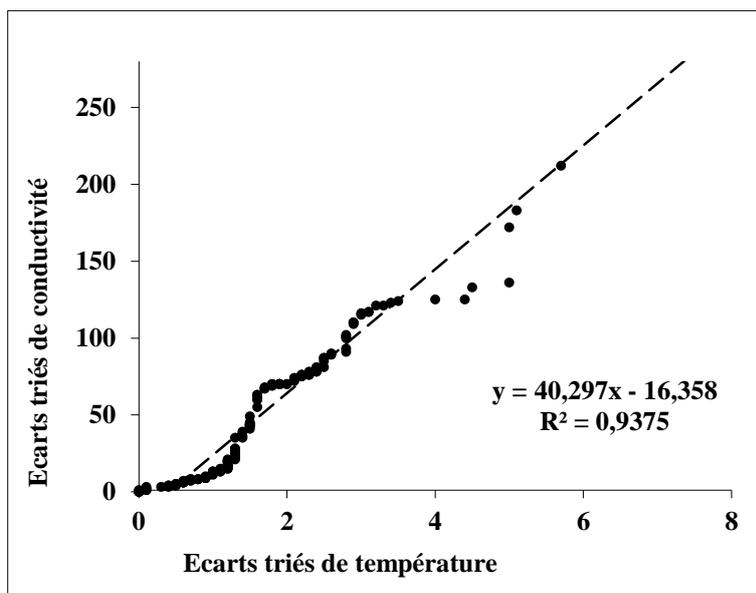
Figure 101 : Classes modales des écarts de conductivité



La série $C_{\mu S}$ est une distribution dissymétrique, ce qui justifie une anamorphose logarithmique cubique.

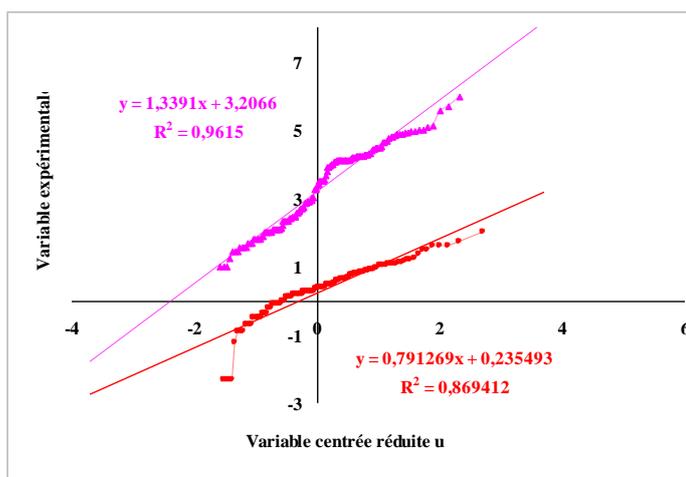
Il est alors possible de croiser ces deux informations d'abord en les classant (Fig. 102) ce qui montre une relation linéique affectée d'un caractère sigmoïde. Il s'agit ici de comparer les structures statistiques des deux distributions. De toute évidence elles ne sont pas les mêmes.

Figure 102 : Distribution classée des écarts de conductivité et de température



Il s'est avéré ensuite que les deux distributions de ces séries secondaires étaient grossièrement gaussiennes à condition de réaliser sur les variables une anamorphose. La meilleure transformation des variables (celle qui aboutit au meilleur ajustement de la droite de Henry (Fig. 103) est obtenue en utilisant une racine cubique pour la conductivité et un logarithme pour la température ; les valeurs nulles étant exclues de l'ajustement.

Figure 103 : Ajustement de la droite de Henry des écarts de conductivité et de température



La figure 103 montre ces ajustements (en rose les écarts de concentration, en rouge les écarts de température). Les ajustements sont dans les deux cas relativement bons ($0,869 < R^2 < 0,964$). Pour les températures, les écarts nuls ne peuvent être déterminés puisqu'il n'y a pas de logarithme de zéro.

Mis à part cette situation, il apparaît que les écarts de température varient presque linéairement entre 0,1 et 7,5°C et que les écarts de conductivité fluctuent plus nettement entre 1 et 212 µS.

Sur ces bases il devient dès lors possible de calculer une moyenne, l'écart type et l'intervalle de confiance de chacune de ces séries.

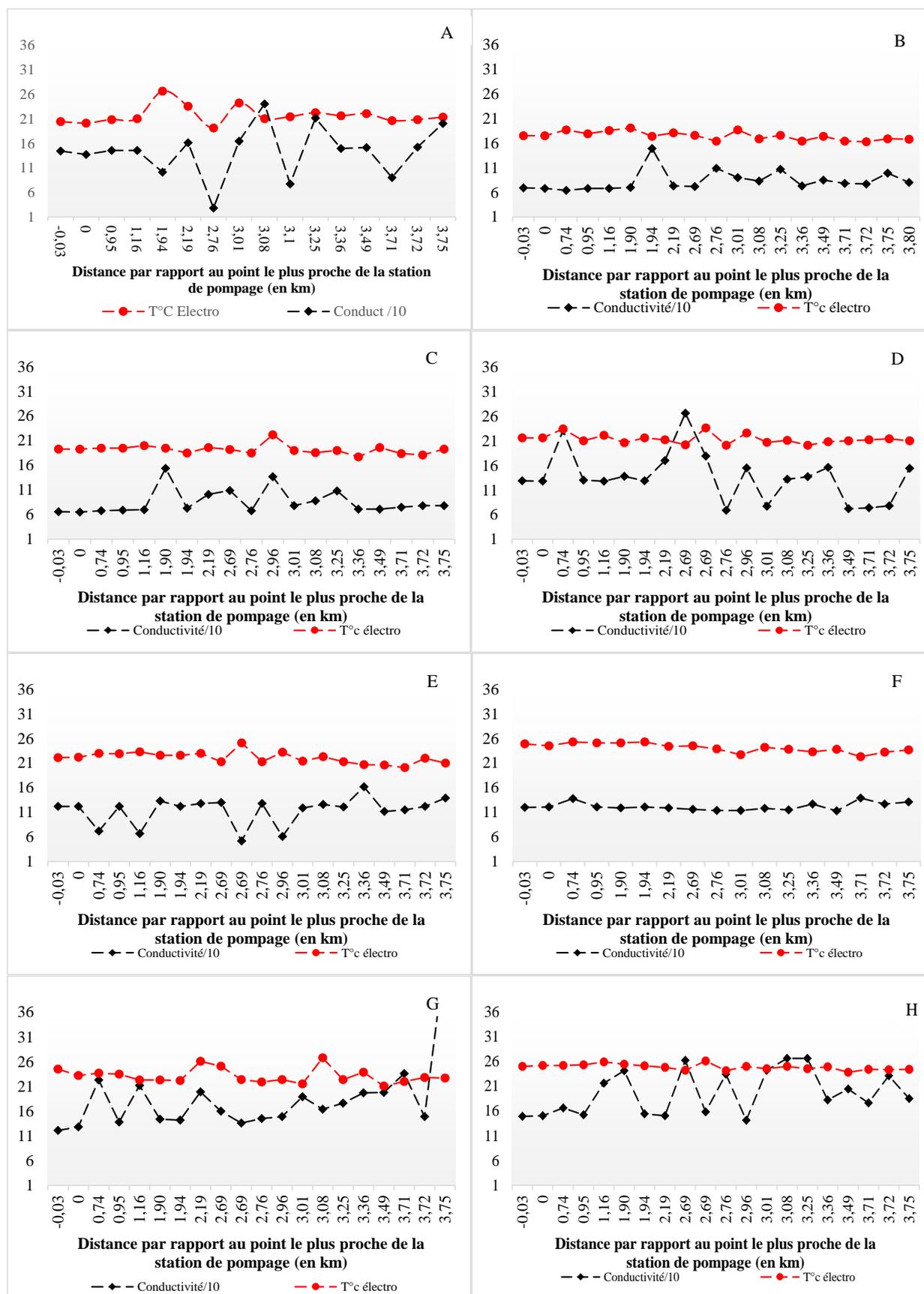
Tableau 43 : Moyenne, écart type et intervalle de confiance de la conductivité et de la température électronique

	Variable transformée		
	Moyenne	Écart type	Intervalle de confiance à 5%
Ln(Ecart T)	-0,3	0,64	0,15
(Écart C) ^{1/3}	3,21	1,45	0,33

2.2.2. Approche par la distance

Cette analyse peut être approfondie. Elle est centrée sur deux indicateurs physico-chimiques de base (température et conductivité électrique) corrélés à la distance (métrique). Pour comparer les valeurs de conductivité électrique et de température, on est passé en \log_{10} (logarithme décimal). Il est apparu qu'utiliser l'ordre des canaux (primaire, secondaire, tertiaire) n'aboutit à rien. La « bonne mesure spatiale » est la distance par rapport à la station de pompage. Dans ce cadre, la distance est la variable explicative, la conductivité et la température les variables à expliquer (Fig. 104).

Figure 104 : Évolution de la conductivité et de la température en fonction de la distance



Il apparaît ainsi que la température croît de la station de pompage à $D = 1,94$ d'environ 21 à 26° (Fig. 104.A) ; ce qui est logique. Par contre, elle chute entre $D = 2,19$ (env. 22°) et $D = 2,76$ (21°), $D = 1,94$ et $D = 3,08$ (Fig. 104.B, C), $D = 3,36$ (Fig. 104.C) ce qui ne peut se comprendre que vraisemblablement par un apport d'eau souterraine.

Dans le cas de la figure 104.D et 104.E, les écarts entre la conductivité depuis la station de pompage (forte) et les points $D = 2,76$ $D = 3,01$ $D = 3,49$ $D = 3,71$ et $D = 3,72$ (ou $D = 0,74$ $D = 1,16$ $D = 2,69$ $D = 2,96$ pour la figure 104.E) s'explique par le non-renouvellement de l'eau dans le canal secondaire d'irrigation. En effet, la mesure sur ces points a été faite juste avant l'ouverture des vannes de régulation hydraulique. De ce fait, $D = 2,76$ $D = 3,01$ $D = 3,49$ $D = 3,71$ et $D = 3,72$ (ou $D = 0,74$ $D = 1,16$ $D = 2,69$ $D = 2,96$ pour la figure 104.E) correspondent à une « eau » plus ancienne que celle des autres canaux d'irrigation (« eau récente », la station de pompage étant ouverte à 7h 30).

Au moment du prélèvement, le niveau du canal était bas (Fig. 104.D). Les écarts de la conductivité par rapport à la distance révèlent au moins deux pics de salinité qui correspondent à des apports d'eau souterraine perceptible dans la figure 104.D.

2.2.3. Approche spatiotemporelle

Sur le plan spatial, ces résultats sont précisés alors qu'il se dégage une véritable structure spatiale. Il apparaît ainsi une variabilité temporelle de la conductivité électrique dans les canaux d'irrigation. Cet état de fait est le résultat du dessalement des terres par les flux d'eau douce. En effet, en l'absence d'eau douce dans les terres salées de Pont-Gendarme, la remontée capillaire de la nappe réalimente la salinité des sols. De ce fait, les premières eaux d'irrigation contribuent au dessalement des terres.

Pour comparer les différentes campagnes de mesures, il a été nécessaire de considérer l'ensemble de la série statistique. À partir de là, des bornes d'égale amplitude ont été mises en place pour les différents indicateurs (conductivité, température, écart de conductivité, écart de température) en considérant les 151 mesures effectuées durant les 8 tournées (Fig. 105).

Pour comparer les différentes campagnes de mesures, il a été nécessaire de considérer l'ensemble de la série statistique. À partir de là, des bornes d'égale amplitude ont été mises en place pour les différents indicateurs (conductivité, température, écart de conductivité, écart de température) en considérant les 151 mesures effectuées durant les 8 tournées.

En termes d'analyse spatiale, une interpolation par krigeage a été faite à partir des classes d'amplitudes proposées dans la figure 105.

Figure 105 : Légende des planches cartographiques

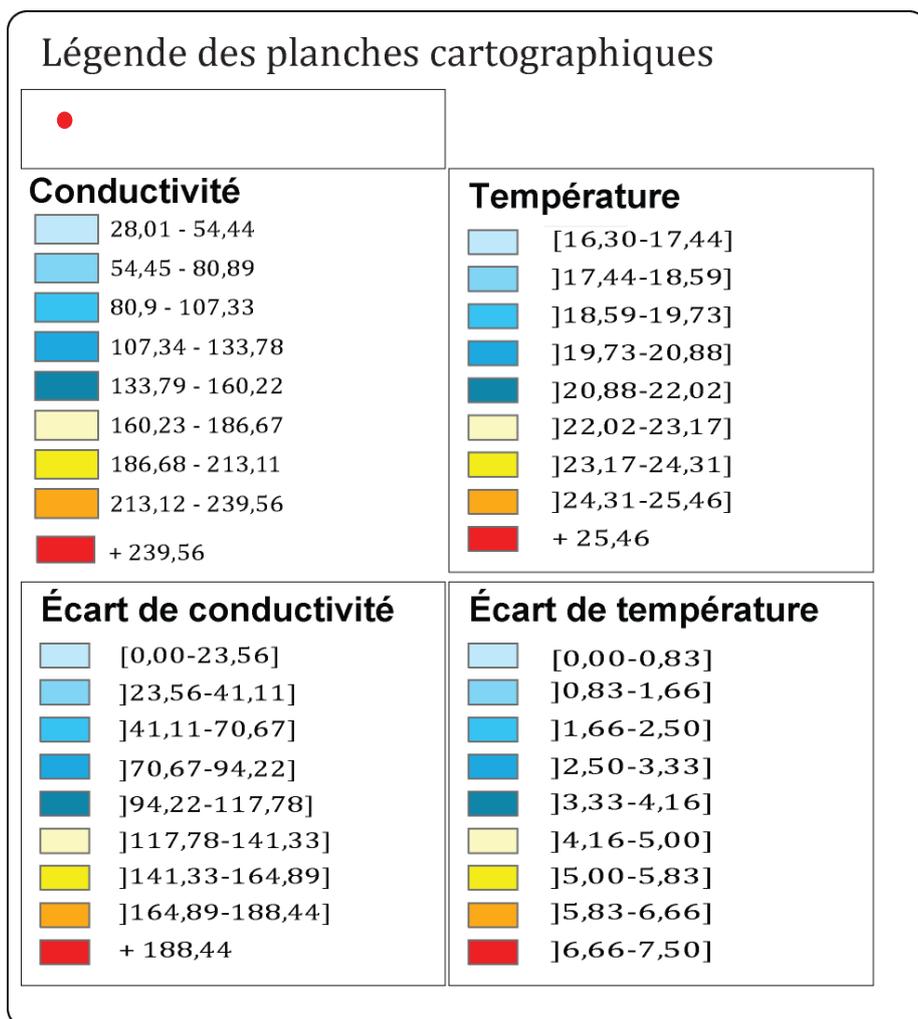
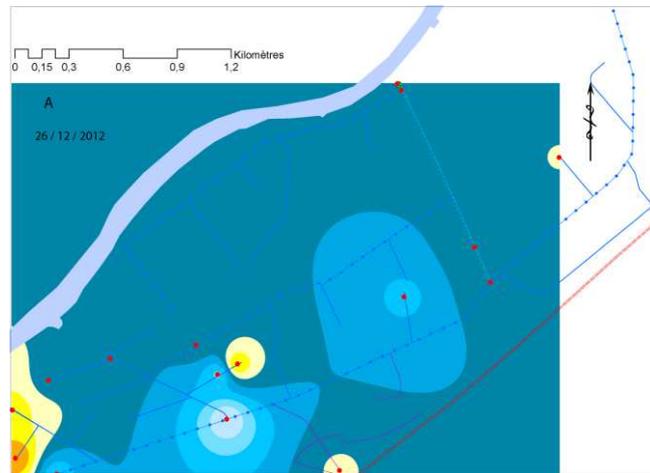
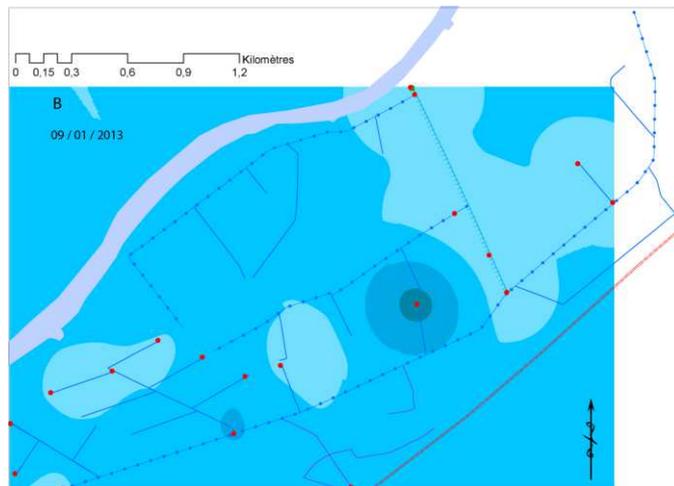


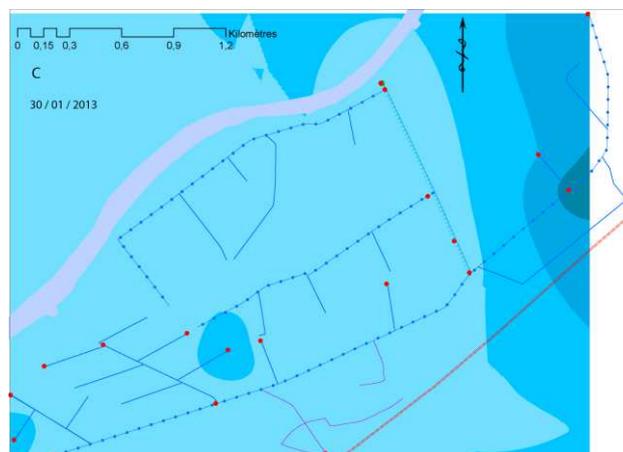
Figure 106 : Évolution spatiotemporelle de la conductivité de l'eau dans les canaux d'irrigation de la cuvette de Pont-Gendarme



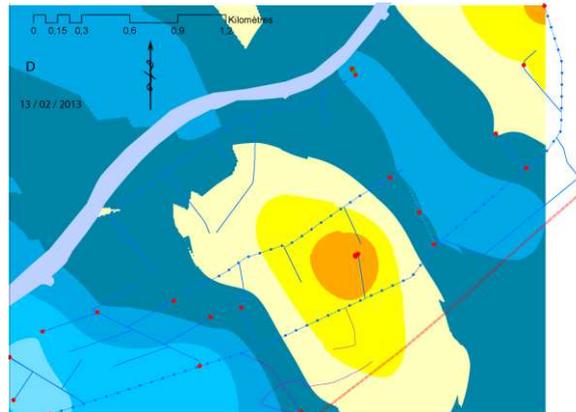
Dans la figure 106.A (le 26/12/2012), on observe des valeurs assez fortes et des points toujours différenciés.



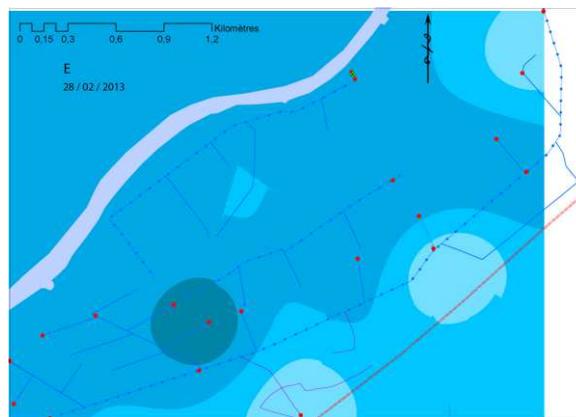
Dans la figure figure 106.B, (09/01/2013), les valeurs se modifient dans le sens d'une bonne disparité des points forts.



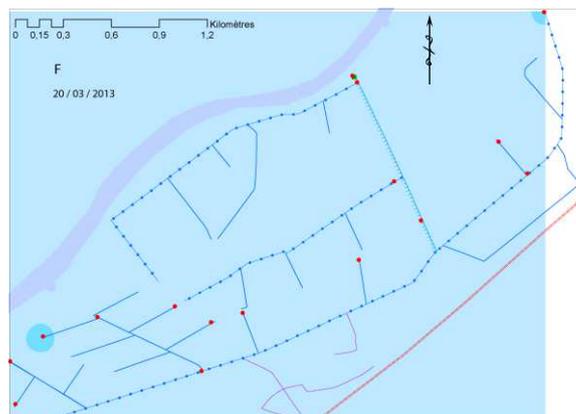
Les valeurs se s'homogénéisent dans la figure 106.C (30/01/2013).



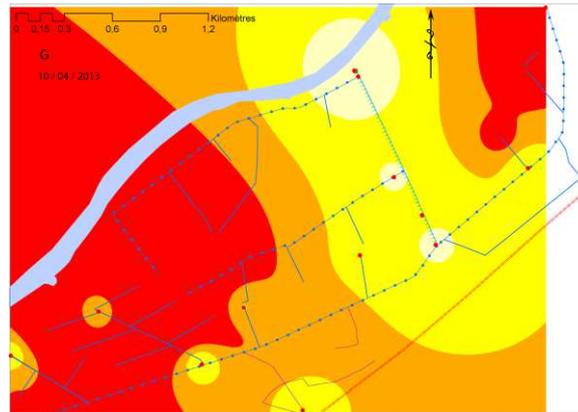
On assiste à l'apparition de point spécifique à forte conductivité aux points **D 10** et **C 18** (Fig. 106.D, le 13/02/2013).



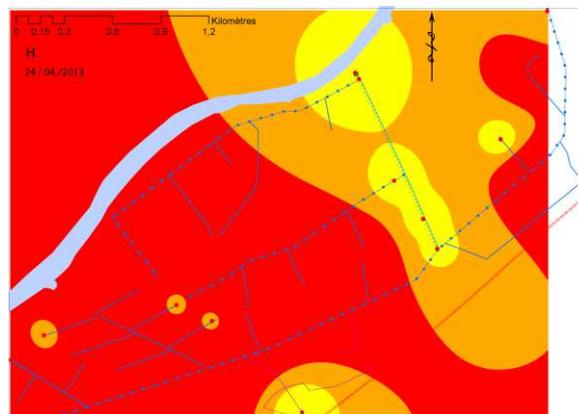
Le champ devient homogène et les valeurs baissent dans l'ensemble de la cuvette (Fig. 106.E, le 28/02/2013).



Les valeurs baissent dans la fig. 106.F (20/03/2013).



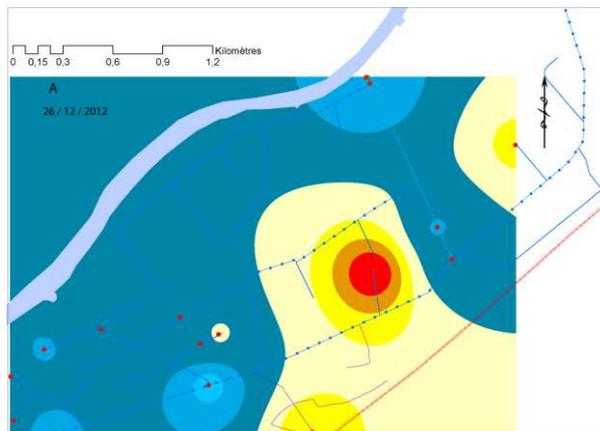
Dans les figures 106.H (10/04/2013) et 106.G (24/04/2013), on observe une très forte augmentation des valeurs. Cette situation viendrait d'une relative dégradation qualitative de l'eau dans le défluent du Lampsar.



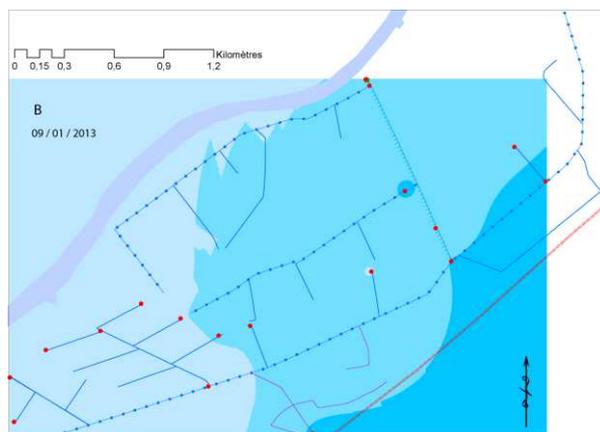
Globalement, les planches cartographiques de la figure 106 montrent une variation temporelle de la conductivité électrique dans la cuvette de Pont-Gendarme. Les valeurs de conductivité les plus élevées sont constamment observées au niveau du point **D** 10.

La variation est très faible dans la figure 106.F. Une évolution positive de la conductivité, à partir du canal principal d'irrigation, est observée dans les figures 106.B, 106.G et 106.H. Ceci correspond aux conditions de mesures que nous avons développées dans les sections précédentes. À l'inverse, les figures 106.A, 106.C, 106.D et 106.E montrent que les eaux du canal maître, au niveau de la station de pompage, aient une conductivité parfois plus élevée, donc une minéralisation plus élevée. Cette situation est liée aux conditions de mesures (station de pompage fonctionnelle durant la durée de la campagne) entraînant un écoulement permanent dans les canaux d'irrigation et le phénomène de « mélange des eaux ».

Figure 107 : Évolution spatiotemporelle de la température de l'eau dans les canaux d'irrigation de la cuvette de Pont-Gendarme



La figure 107.A montre une structure de la température hétérogène avec des variations importantes sur deux à trois points (**D 10** et **D 17**).



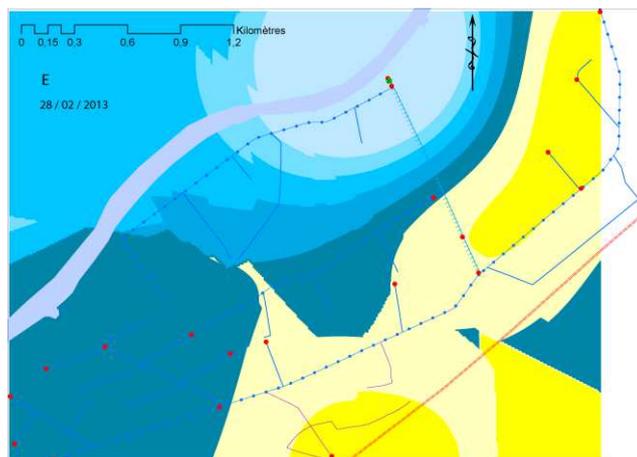
Les valeurs s'homogénéisent dans les figures 107.B et 107.C avec une variation dans le sens sud-ouest nord-est.



Les valeurs restent homogène dans la figure 107.D, mais la température augmente par rapport aux mesures précédentes.



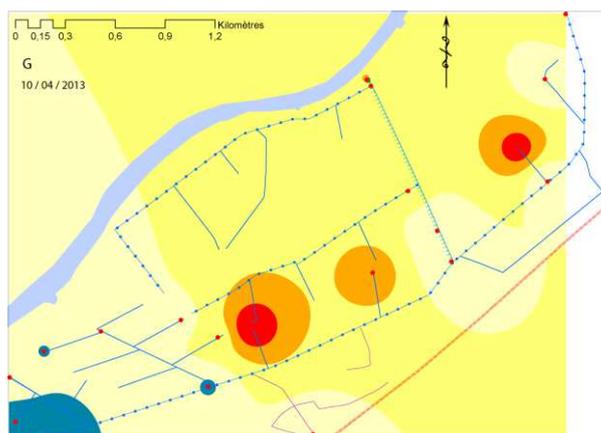
La figure 107.E montre une variation nord (depuis le fleuve) sud (vers la route nationale) de la température de l'eau.



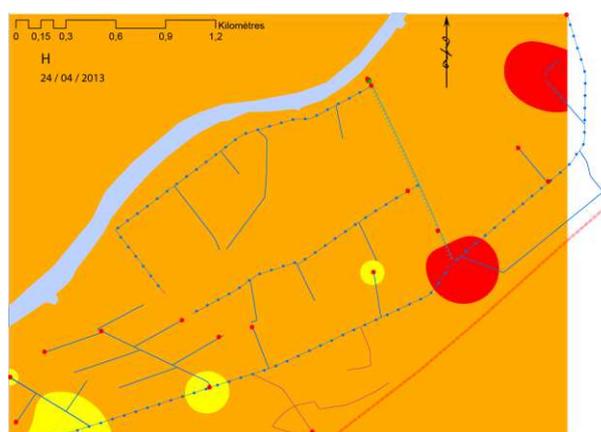
Les valeurs de températures s'homogénéisent avec une unevariation sud-ouest nord-est (Fig. 107.F).



La figure 107. G montre une croissance de la température par rapport aux six mesures précédentes. Les températures élevées touchent deux points (canaux tertiaires), aux points **D 9** et **D 15**.



La figure 107.H montre une croissance encore plus importante de la température sur l'ensemble de la cuvette. Les eaux les plus chaudes sont relevées aux points **C 19** et **D 17**. Ces points chauds (Fig. 107.G et H) sont liés à des eaux plus basses dans les canaux d'irrigation par rapport aux autres points mesurés (effet local) ; l'eau se chauffant, au soleil, plus rapidement dans des situations de basses eaux que de hautes eaux.



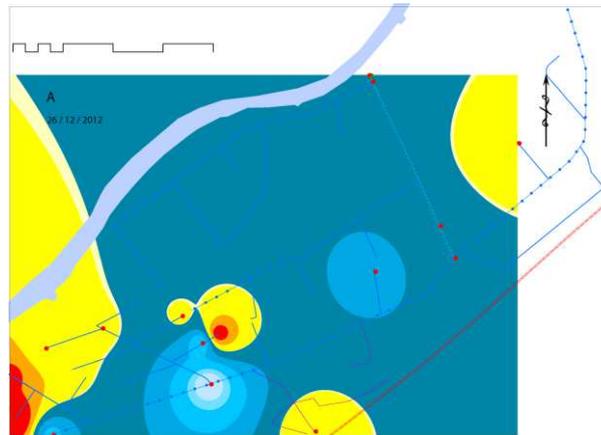
Globalement, la température de l'eau est plus élevée au point **D 10** et **D 15** lors de la première campagne (Fig. 107.A). Dans la deuxième et troisième campagne de mesures (107.B et 107.C), les températures sont globalement faibles avec une variation positive, sud-ouest – nord-est, observée.

Dans la figure 107.D, la température est globalement homogène (variation faible), ce qui n'est pas le cas lors de la sixième campagne de mesures (Fig. 107.H). Dans cette dernière figure, on observe une variation positive de la température depuis le canal maître et sur les points suivants : **D 20**, **C 16**, **D 15** et **C 18**.

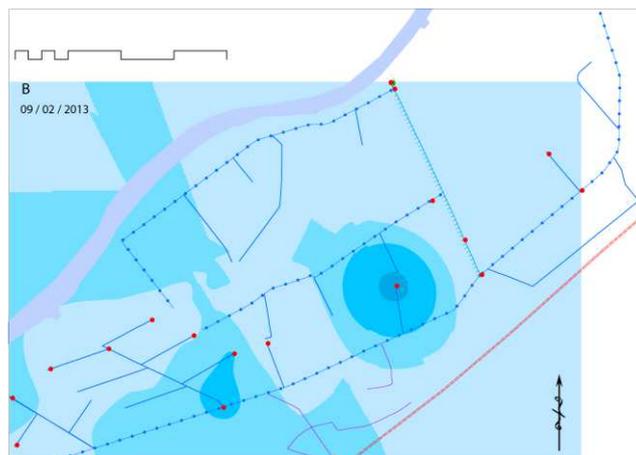
Les deux dernières mesures (Fig. 107 G et H) montrent que la température est plus élevée par rapport aux mesures précédentes, à l'instar de la conductivité électrique. La qualité des eaux sur le Lampsar semble se détériorer légèrement au cours de la saison sèche.

Les figures 108 et 109 illustrent les variations de la conductivité électrique à partir d'un ou de plusieurs points de mesure. Cette perspective permet de mieux percevoir la structure spatiale de la minéralisation et de la température des eaux.

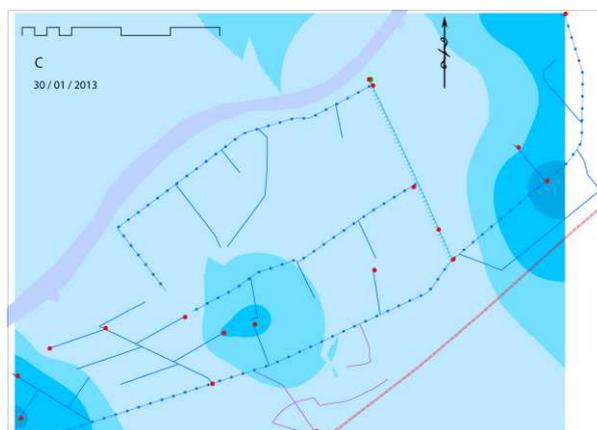
Figure 108 : Écart de la conductivité de l'eau dans les canaux d'irrigation de la cuvette de Pont-Gendarme



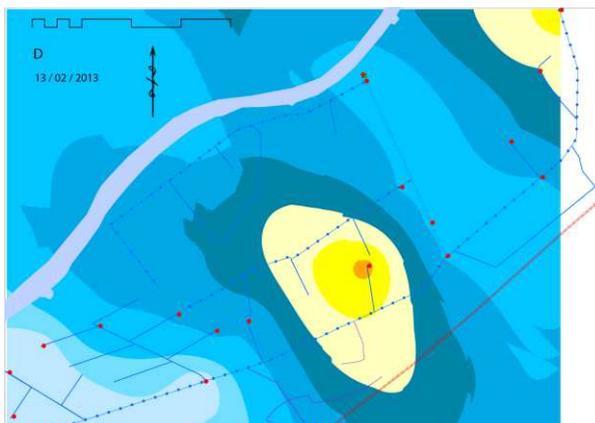
Dans la figure 108.A, il apparaît que la conductivité varie à partir du premier point mesuré (C 1) ; la valeur la plus élevée étant observée au niveau des points **D 3** et **D 7**. Les écarts de conductivité sont très importants dans la figure 108.A.



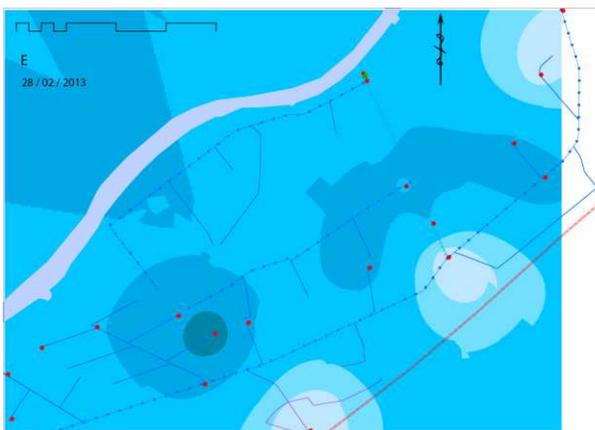
Dans la figure 108.B, la valeur maximale est observée autour des points **D 10** et **C 1 / D 8**. Les écarts de conductivité électrique sont moins importants.



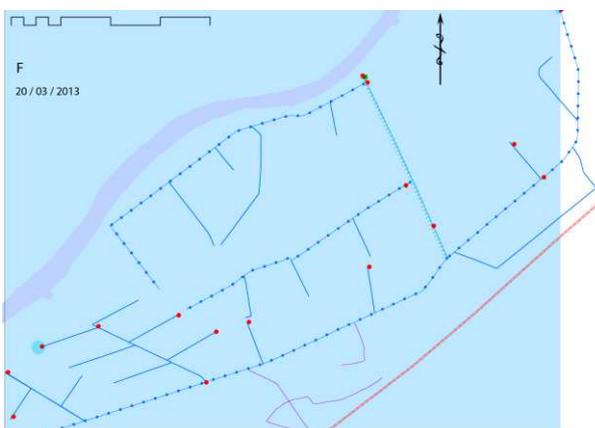
Les écarts de conductivité restent faibles dans la figure 108.C. Les points culminants de la conductivité se déplacent, dans la 108.C, aux points **D 8 / D 9**, **D 3** et **C 16**.



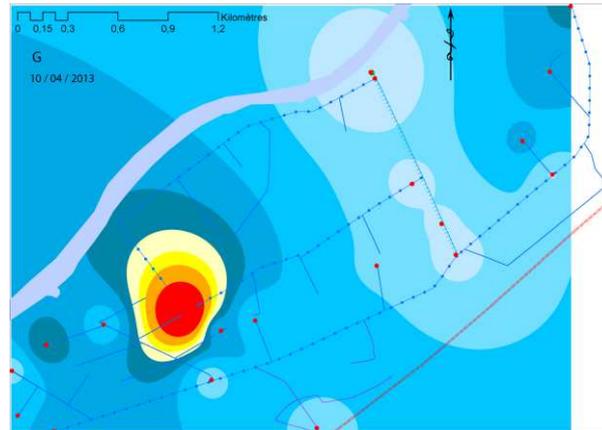
La figure 108.D montre une variation nord-ouest – sud-est ; les points culminants se situant au niveau de **D 10** et **C 18**.



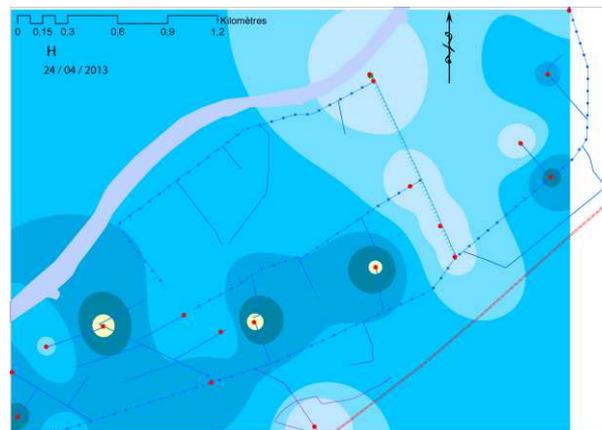
Dans la figure 108.E, la variation de la conductivité a pour point de départ **C 19** et **D 20** (deux derniers points mesurés). Le point culminant se situe au niveau de **D 8**. Les écarts de conductivité sont faibles dans la figure 108.E.



Les écarts de conductivité deviennent quasi nuls dans la figure 108.F.

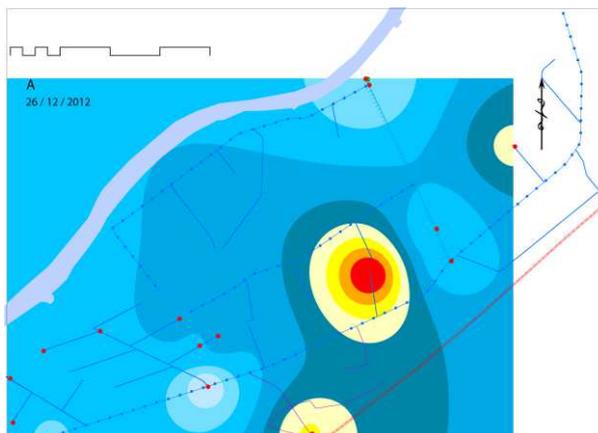


Les deux dernières campagnes de mesures montrent clairement une variation de la conductivité depuis le canal principal d'irrigation. Cet écart est plus important pour la figure 108.G que dans la Figure 108.H. Pour le cas de la figure 108.G, le point culminant se situe autour du point D 7. Les écarts sont plus faibles pour 108.H

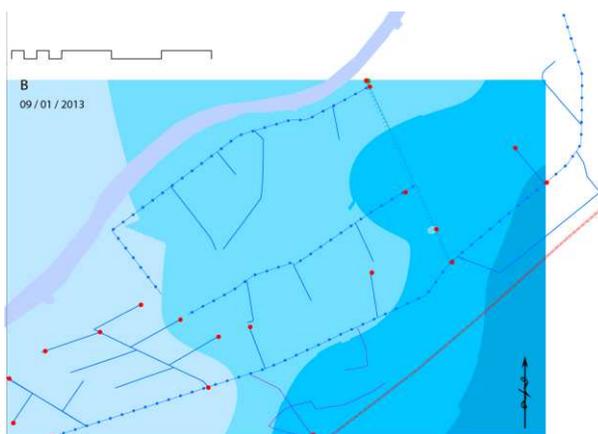


Il apparaît que la qualité de l'eau se dégrade depuis la station de pompage dans les figures 108.C, E, G et H révélant une structure spatiale plus ou moins cohérente (variation sud-ouest à nord-est) avec des ruptures locales traduisant, sans doute, une remontée de la nappe phréatique. Les figures 108.D (structure périphérique à salinité faible) révèlent une anomalie qu'on a déjà précisée dans ce chapitre. La prise en compte de cette anomalie confirme l'existence d'une variation nord-sud de la qualité de l'eau dans les canaux d'irrigation.

Figure 109 : Écart de la température de l'eau dans les canaux d'irrigation de la cuvette de Pont-Gendarme



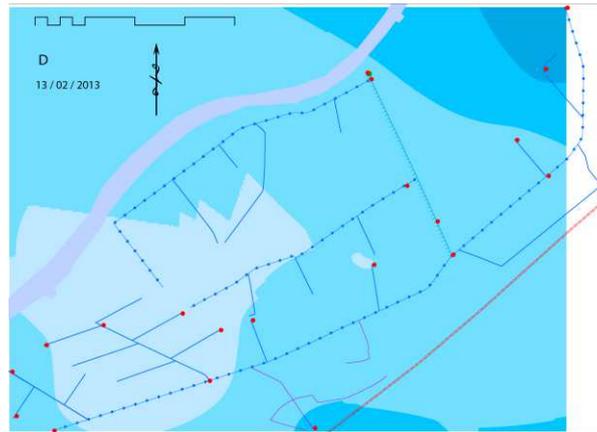
La figure 109.A montre une variation de la température à partir du premier point mesuré (C 1). Les écarts de températures restent importants ; D 10 enregistrant la mesure de température la plus élevée. Ce même constat a été fait pour le cas de la conductivité électrique.



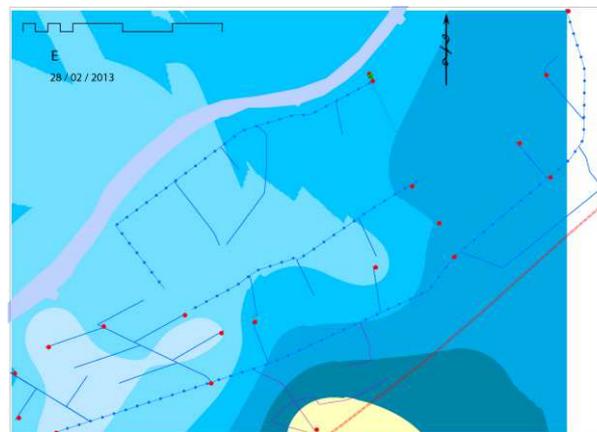
La figure 109.B montre des écarts de températures faibles et un gradient sud-ouest – nord-est.



Le même gradient (sud-ouest – nord-est) est observée dans la figure 109.C. et 109.D.



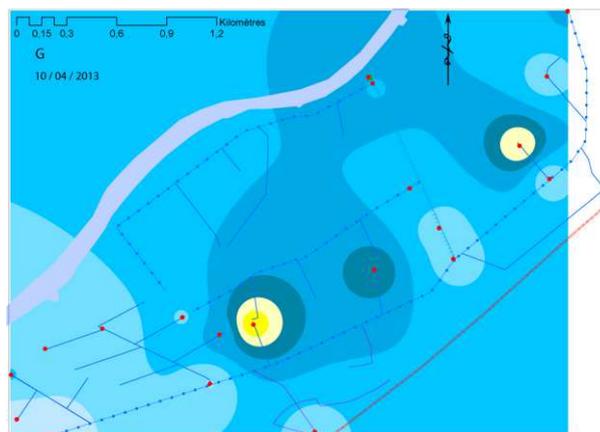
La température croît au fur et à mesure que nous remontons, dans la mesure, de l'aval vers l'amont dans les figures 109.B, C et D. L'augmentation de la température, au cours de la journée, semble être à la base de l'existence de ce gradient.



Dans le figure 109.E, on observe une variation du gradient depuis les points **C 2**, **D 4** et **D 8**.



La figure 109.F montre un gradient sud-ouest nord-est ; les écarts étant plus faibles par rapport aux figure 109.C et E.



Dans la figure 109.G, on observe un écart de température important ; les points les plus importants se situant aux points D 19 et D 15. L'écart de température est faible dans la figure 109.H.



Globalement, on observe une variation sud-ouest – nord-est des écarts de température de l'eau dans la cuvette de Pont-Gendarme.

Il n'existe pas une réelle structure spatiale pour le cas de la minéralisation. La seule constante (variation de la minéralisation depuis le canal principal) est observée lors des deux dernières tournées comme on a pu le voir dans les figures 90 et 91. Les mesures de conductivité les plus élevées touchent constamment deux à trois points dans le réseau d'irrigation. En fonction de la distance, la conductivité, très faible sur la station de pompage, collecte le sel issu de la salinité primaire du sol.

Les figures 106 et 108 confirment l'augmentation de la conductivité entre les premières tournées (fin décembre, début de la campagne de contre-saison froide) et la dernière campagne (fin avril, au cœur de la campagne de contre-saison chaude). Cette variation temporelle de la qualité de l'eau est liée à une certaine dégradation de la qualité de l'eau dans le marigot du Lampsar.

Certaines campagnes de mesure montrent que le jeu d'ouverture et de fermeture des vannes de régulation hydraulique a aussi une influence sur la variation spatiotemporelle de la qualité de l'eau dans les canaux d'irrigation (renouvellement des eaux, mélange et/ou isolement des « eaux anciennes » en aval et des « eaux nouvelles » en amont).

2.2.4. Approche normative de la qualité de l'eau pour l'irrigation

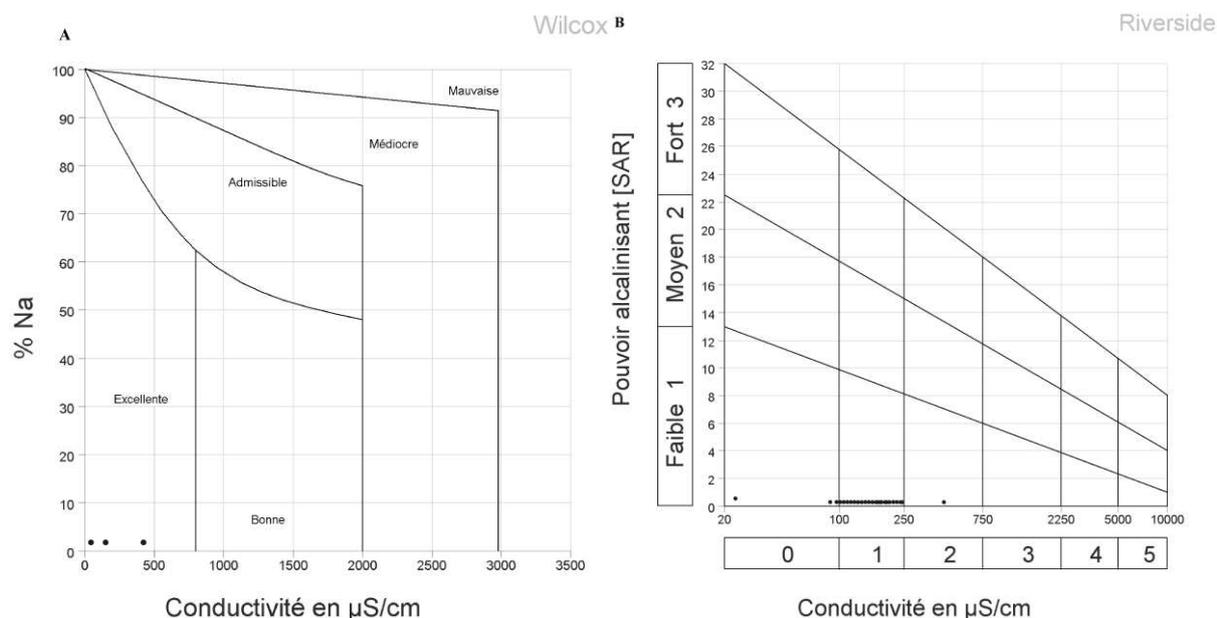
Un classement a été proposé par United States Department of Agriculture (USDA) en 1954. Ce classement sert de référence pour évaluer la qualité des eaux d'irrigation. Les classes 1 et 2 sont jugées relativement bonnes pour l'irrigation alors que la classe 3 nécessite de très bonnes conditions de drainage. La classe 4 concerne les eaux impropres à l'irrigation (Tableau 44).

Tableau 44 : Classification de la qualité des eaux d'irrigation par l'USDA (1954)

Classe	Conductivité électrique ($\mu\text{S/cm}$)	Indice de salinité	Problèmes de salinité
Classe 1	[100 - 250]	Basse salinité	Problèmes de salinité bas sans nécessité d'aménagement supplémentaire
Classe 2	[250-750]	Salinité modérée	Impact potentiel de la salinité sur les plantes sensibles. Nécessité de drainage occasionnel
Classe 3	[750-2 250]	Haute salinité	Impact sur les plantes ayant une faible tolérance au sel. Nécessite un bon système de drainage
Classe 4	[2 250 - 5 000]	Très haute salinité	Impact sur les plantes ayant une forte tolérance au sel

Ce classement est complété par le SAR (Sodium Adsorption Ratio ou Coefficient d'Absorption du Sodium : pouvoir alcalinisant) qui fait référence au pouvoir d'infiltration de l'eau d'irrigation et à l'activité relative des ions sodium dans les réactions d'échange avec le sol (FAO, 1989). Le SAR est aussi classé en quatre classes : 1 (bas taux de sodium), 2 (taux moyen de sodium ; problèmes sur les sols à la texture fine ou sur les plantes sensibles au sodium), 3 (haut taux de sodium ; problèmes dans la plupart des sols), 4 (très haut taux de sodium). La combinaison de ces deux indices, permettant de mesurer l'influence de la qualité de l'eau d'irrigation sur le sol, est résumée dans le diagramme de Wilcox (Fig. 110).

Figure 110 : Diagrammes de Wilcox et de Riverside de la cuvette de Pont-Gendarme



En abscisse, l'échelle du digramme de Wilcox est comprise entre 0 et 3 500 μS selon la classification présentée dans le tableau 44. Les eaux sont considérées comme étant d'excellente qualité avec un pouvoir alcalisant nul.

La figure (110.A) révèle une classe d'eau dans la cuvette de Pont-Gendarme. Il s'agit de la classe C1 (excellente qualité d'eau pour l'irrigation).

Le Sodium Adsorption Ratio traduit un pouvoir d'alcalinisation (processus d'alcalinisation traduisant la fixation du sodium sur le complexe adsorbant du sol) nul dans la cuvette de Pont-Gendarme (Fig. 110.B). Autrement dit, l'eau d'irrigation reste, globalement, de bonne qualité ; le pouvoir alcalisant étant nul. Elle peut être appliquée à tous les types de sols ; le risque d'accumulation du sodium à un niveau préjudiciable étant très minimal. Le diagramme de Riverside (Fig. 110.B) montre que le risque d'accumulation de sel dans le sol est très faible.

On peut en déduire que la qualité de l'eau douce ne contribue pas à la dégradation des sols dans la cuvette de Pont-Gendarme.

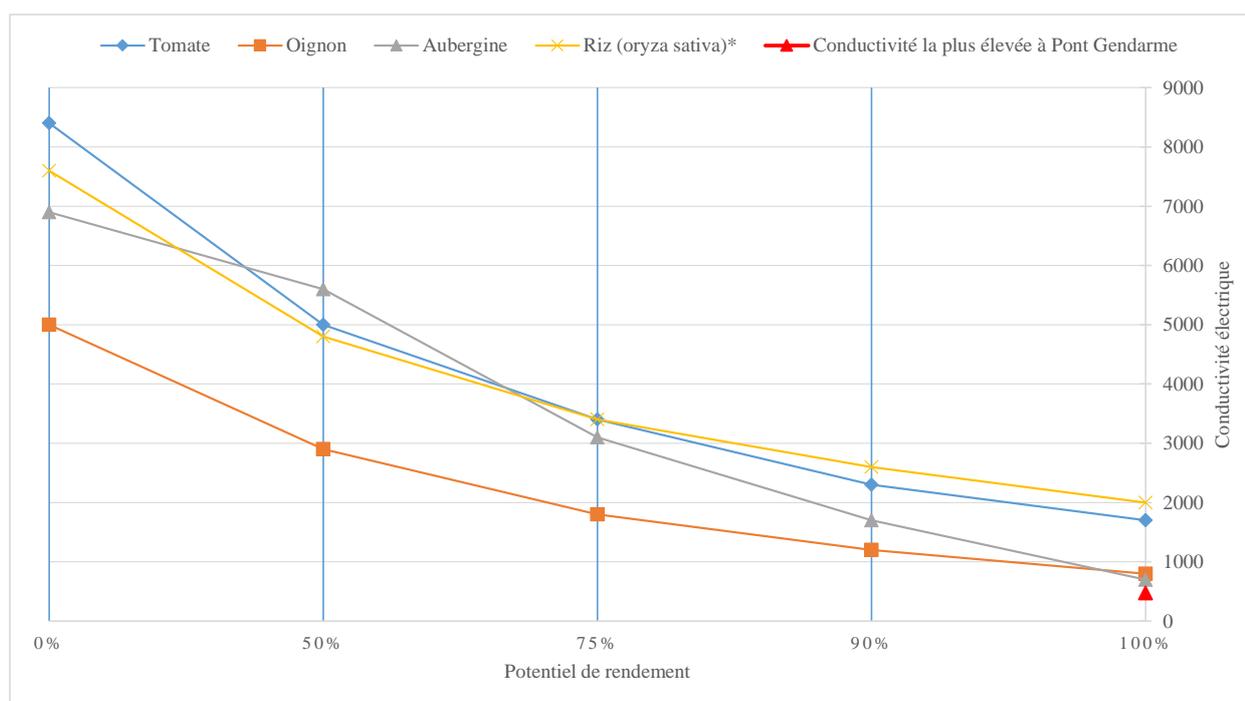
2.2. Des impacts dans la productivité agricole non négligeable

L'impact sur la productivité agricole est mesuré par le biais de la sensibilité des plantes (sur cette question, il y a sans doute d'autres facteurs, autres que la sensibilité, à prendre en compte) au sel. En prenant en compte les grandes spéculations de la cuvette de Pont-Gendarme, la figure (111) montre l'influence du niveau de conductivité électrique sur le potentiel de rendement. En fonction des spéculations, on peut observer que :

- l'oignon est relativement peu tolérant à la variation de la salinité ;
- l'aubergine, la tomate et le riz ont une tolérance moyenne à la variation du sel dans les eaux d'irrigation.

Une dégradation de la qualité de l'eau peut avoir des conséquences rapides et néfastes sur le potentiel de rendement (oignon), ce qui n'est pas le cas des autres cultures qui ont une meilleure tolérance à la croissance de la salinité ; les rendements chutant sensiblement à un taux élevé supérieur à 4 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Figure 111 : Évolution du rendement potentiel en fonction de la conductivité électrique



L'impact de l'eau d'irrigation est faible en termes de productivité (rendement) dans les parcelles irriguées de la cuvette de Pont-Gendarme. La mesure de conductivité la plus élevée est proche des seuils limites pour les cultures d'aubergine et d'oignons. Par contre, plus les sols sont salés (salinité primaire), plus lente est la croissance des plantes cultivées (oignon). En effet, la salinité du sol fait subir à la plante un stress qui rallonge la croissance des plantes tout en réduisant le niveau de rendement. En dehors de la riziculture, le drainage artificiel n'est pas pratiqué dans les cuvettes du delta du Sénégal. Or, le drainage est le principal facteur de désalinisation temporaire des sols et des nappes phréatiques salés.

3. En conclusion

La qualité de l'eau d'irrigation ne détermine pas fondamentalement les inégalités sociales dans l'accès à la terre dans la cuvette de Pont-Gendarme. Celle-ci est déterminée par la fertilité du sol (salinité primaire) et la position altitudinale qui entraîne certaines difficultés d'accès à l'eau d'irrigation dans les parcelles irriguées. Aussi, les terres salées des PIV ou d'autres parcelles dans les périmètres transférés disposent d'une eau de meilleure qualité (distance faible par rapport à la station de pompage). Cette situation ne renvoie pas à une régulation anthropique dans l'accès à l'eau d'irrigation et à la terre, ni à une stratégie sociospatiale bien définie.

Conclusion de la deuxième partie

La figure 112 permet de synthétiser les résultats de cette deuxième partie à travers les changements sur le milieu. En situation traditionnelle, l'homme (au sens de société) subit les conditions du milieu (sécheresse, remontée de la langue salée, etc.) qui déterminent la ressource (surface inondée, etc.) et les systèmes d'adaptations (partage de l'eau et de l'espace entre les activités par une certaine mobilité spatiotemporelle). Ceci est à la base des règles d'occupation du sol (foncier) et de l'appropriation de l'espace.

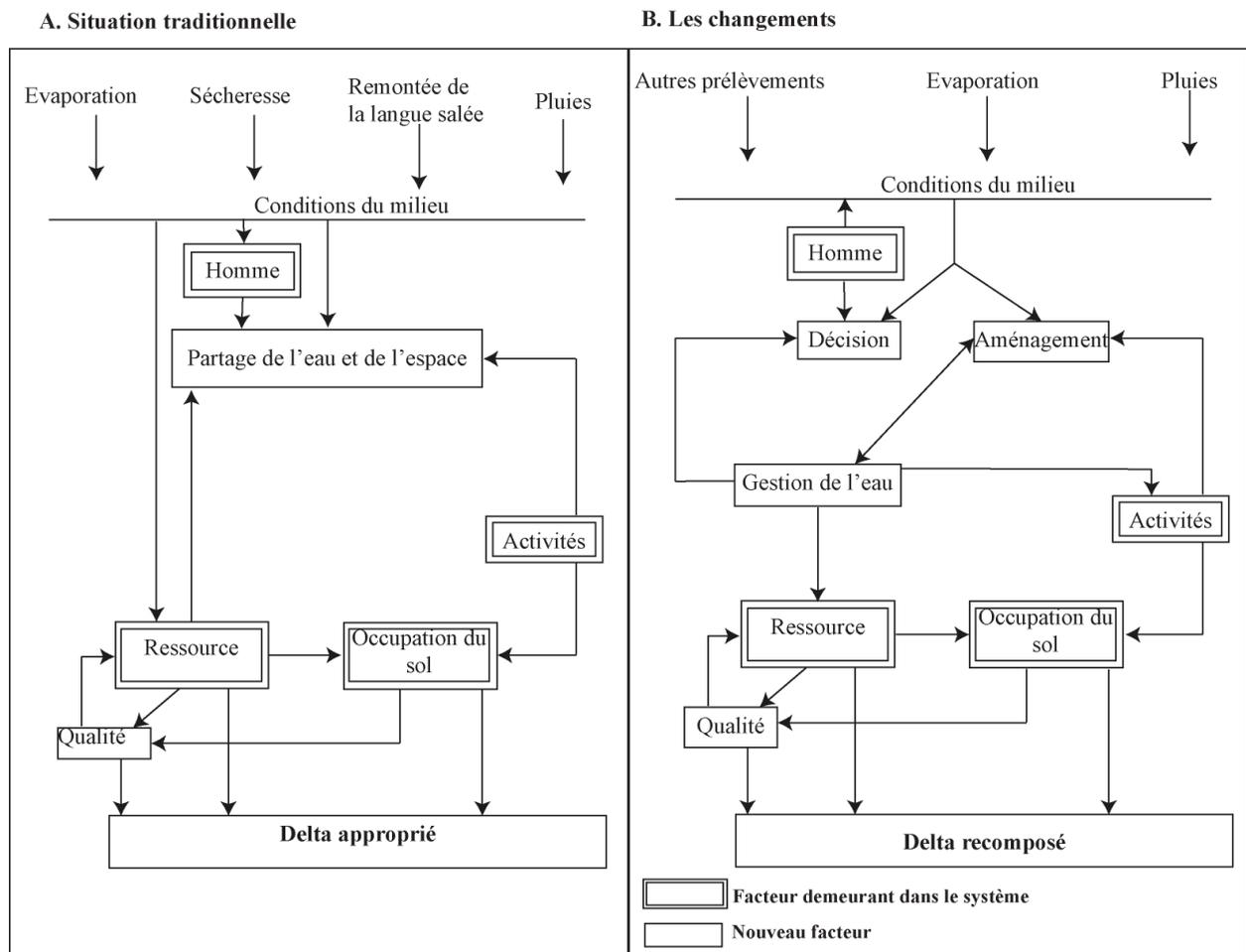
À l'inverse, en situation moderne, l'homme agit sur les conditions du milieu, donc sur la disponibilité de l'eau et des terres. Le développement hydraulique, la structure scalo-spatiale des barrages, leur diversité sont les conditions de la structure de l'offre, en contribuant d'une part à une anthropisation extrême du milieu à une échelle locale (qui bouleverse les relations de l'homme à la nature), d'autre part à une réponse à la crise énergétique ou à la crise de l'eau à une échelle plus globale. Cette anthropisation influence le système décisionnel (politique économique, etc.) et le système d'aménagement (aménagements hydroagricoles). Aussi émerge des modalités de gestion des ressources, des usages et des aménagements. Cet ensemble est à la base de la recomposition territoriale dans le delta du Sénégal.

Certaines variables demeurent dans le système, mais en changeant de situations :

- le cadre des activités a changé. Aux activités traditionnelles (agriculture pluviale et de berges, élevage transhumant, pêche continentale) viennent s'ajouter des activités modernes (agriculture irriguée, agribusiness, etc.) qui bouleversent complètement les règles d'exploitation de l'espace et l'émergence de nouveaux outils de régulation des conflits (POAS).
- Les règles d'occupation du sol ont évolué. La question foncière est un sous-bassement de la gestion de l'eau dans le delta du Sénégal.
 - La terre (fertilité) et l'eau douce (disponibilité) sont structurellement liées ; l'une valorisant l'autre et *vice versa*. Cette relation systémique complexe (car mettant à l'œuvre des rapports ontologiques entre société et nature) détermine les trajectoires spatiales (appropriation, conflits) et le niveau de maîtrise technologique. Cette question est perceptible tant dans l'appropriation de la ressource que dans les processus de dégradation.
 - Sur le plan de l'appropriation, des logiques anthropologiques, religieuses et politiques différentes se superposent dans le delta du Sénégal. Ceci rend encore plus complexes les réformes foncières.
 - Les bases actuelles de la gestion foncière s'appuient sur un système de semi-propriété privée, après l'échec d'un système de propriété privée expérimentée durant la période coloniale. La perspective d'une nouvelle réforme foncière axée, une nouvelle fois, sur la propriété privée (ressource fongible) dans l'espace rural peut être à la base d'une nouvelle restructuration des systèmes territoriaux et économiques (insécurité alimentaire, rente foncière) alors que le territoire hybride révèle des spéculations foncières imprévues par la réforme de 1964.
 - Le développement des agribusiness et, globalement, des périmètres irrigués privés attribue à la terre une valeur marchande (échangeable) assez importante.
 - La libéralisation du système foncier, en l'absence d'une transition anthropique réussie, peut être une limite pour l'agriculture familiale dont l'importance dans la lutte contre la pauvreté ou la migration urbaine est certaine.
- Les modalités d'exploitation des ressources ont changé. Il ne s'agit plus de gérer une pénurie, mais une disponibilité annuelle en eau douce et les usages de l'eau dans le delta du Sénégal.

- La problématique de la qualité de l'eau n'est plus la même. Il ne s'agit plus de la remontée de la langue salée, mais des conditions locales du milieu et des activités (présence de végétaux aquatiques, remontée de la nappe salée, localisation du système de drainage des eaux usées agricoles, pratiques agricoles, etc.). La dégradation des terres introduit celle de la fertilité avec les processus, primaires et secondaires, de salinisation dans le cadre de l'irrigation développée depuis le début des années 1960. La relative bonne qualité des eaux d'irrigation, la perception des populations vis-à-vis de l'eau et de la terre expliquent les relations qui s'établissent entre population et ressources naturelles et qui se traduisent par une structure complexe de la demande.

Figure 112 : Schéma analytique des changements intervenus dans le delta dans le cadre de l'hydraulique moderne



De nouvelles variables apparaissent : la gestion de l'eau, les aménagements, le système décisionnel, etc. Ces variables modernes ont des impacts sur l'espace et sur les transformations socioanthropologiques induites par la modernité.