



HAL
open science

Dynamiques bio-géochimiques en rizière - les apports du monitoring in situ

Fabienne Trolard, Kamran Irfan, Tanvir Shahzad, Guilhem Bourrié

► **To cite this version:**

Fabienne Trolard, Kamran Irfan, Tanvir Shahzad, Guilhem Bourrié. Dynamiques bio-géochimiques en rizière - les apports du monitoring in situ. Le riz et la Camargue : vers des agro-systèmes durables, 2018. ⟨hal-03574418⟩

HAL Id: hal-03574418

<https://hal.inrae.fr/hal-03574418v1>

Submitted on 15 Feb 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Le Riz et la Camargue

VERS DES AGROÉCOSYSTÈMES DURABLES

Jean-Claude **MOURET**
coordination scientifique

Bernadette **LECLERC**
coordination éditoriale



Dynamiques biogéochimiques en rizière. Les apports du monitoring *in situ*

Fabienne TROLARD, Guilhem BOURRIÉ, Lise CARY, Muhammad Farrakh NAWAZ

P

OUR LES AGRICULTEURS de Camargue, la riziculture est toujours considérée comme une production délicate, alors que pour produire du blé dur, « il suffit de suivre les indications sur les paquets d'engrais pour obtenir les rendements potentiels!... » (Guillot comm. pers.). Cela se traduit en particulier par des rendements très variables (de 4 à 11 t/ha), d'une année à l'autre et/ou d'une parcelle à l'autre et cette variabilité est une constante dans tous les espaces rizicoles de par le monde.

Les travaux récents (Mehargh & Mehargh 2015) ont été essentiellement consacrés à la phénologie et la biologie moléculaire de la plante riz mais trop peu d'attention a été portée aux conditions pédoclimatiques de production, et en particulier au fonctionnement du système « sol-eau-plante ». Or la croissance du riz dépend, à la différence des autres céréales, d'un milieu aquatique complexe avec un support de culture reposant sur une semelle de labour quasi imperméable et des phases d'inondation variables dans le temps. D'un point de vue biogéochimique, la rizière est un agrosystème particulièrement dynamique. En effet, la saison rizicole a pour conséquence d'une part, de maintenir les sols en état de saturation permanente par l'eau et, d'autre part, de produire en quelques mois une biomasse du riz d'une dizaine de tonnes de matière sèche à l'hectare au moment de la récolte à partir de quelques kilos de semence. Ces deux processus – inondation et croissance végétale – introduisent des perturbations dans le milieu par des réactions chimiques qui modifient l'acidité (pH) et les conditions d'oxydoréduction (pe), tout en mobilisant certains éléments chimiques et pas d'autres.

Pendant plusieurs années, nous avons effectué un suivi *in situ* de paramètres caractérisant l'eau, le sol et le milieu au cours du développement de la culture dans les rizières. L'objet de ce chapitre est d'exposer les résultats que nous avons obtenus en Camargue et d'en tirer les leçons généralisables et utilisables dans la conduite de la culture du riz.

LE SYSTÈME SOL-EAU-PLANTE ET LES PARAMÈTRES BIOGÉOCHIMIQUES

Représentation du système sol-eau-plante dans une rizière

Une rizière peut être représentée comme un système sol-eau-plante organisé dans le temps et l'espace. Pour caractériser les différents processus biogéochimiques qui vont l'animer, il faut considérer simultanément différents compartiments du bas vers le haut (fig.1):

- les horizons profonds du sol qui supportent la rizière et dans lesquels fluctue la nappe en fonction des saisons;
- la semelle de labour très compacte, construite par l'agriculteur, qui doit, d'une part, assurer la portance des engins agricoles pendant la saison rizicole, et d'autre part, limiter l'infiltration des eaux d'irrigation apportées massivement, soit environ 25 000 m³/ha/an, dans la rizière pour maintenir l'inondation des parcelles;
- l'horizon de labour dans lequel le riz va développer son système racinaire;
- le plant de riz;
- la lame de submersion, c'est-à-dire la couche d'eau au-dessus du sol, dont l'épaisseur s'accroît avec le développement du riz.

Dans un écosystème, qu'il soit cultivé ou non, la composition chimique de la solution du sol, considérée comme un nœud à l'interface des différents compartiments (Bourrié & Lelong 1994), traduit instantanément les transformations du milieu. Pour reconstituer les processus mis en œuvre par la plante pour sa croissance et évaluer son impact sur le sol, support de culture, nous avons recours à la fois à des mesures de la qualité de l'eau, un suivi de la dynamique de la culture et à la modélisation géochimique.

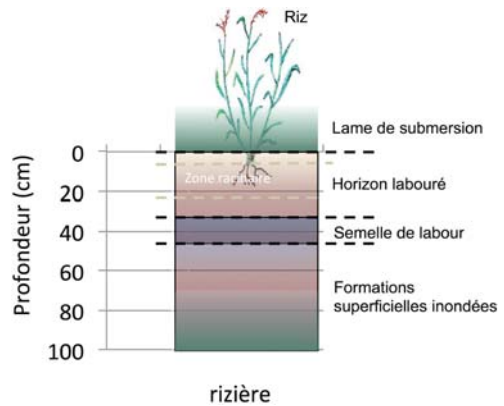


Figure 1. Compartiments du système sol-eau-plante à considérer dans la rizière (d'après Irfan et al. 2017)

Deux variables maîtresses : pH et pe

Les deux principales variables qui vont contrôler les réactions dans le sol sont le potentiel de l'hydrogène (pH) et le potentiel de l'électron (pe). Ces deux variables ne sont mesurables que dans l'eau. Dans ce chapitre, nous n'entrerons pas dans le détail des principes fondamentaux de la thermodynamique chimique qui définissent le pH et le pe (ou le Eh), nous n'insisterons que sur les hypothèses à considérer pour interpréter les mesures de terrain. Bien que le formalisme théorique de ces deux grandeurs soit le même, une mesure de pH, à l'aide d'une électrode pH, n'a pas le même sens qu'une mesure de potentiel d'oxydoréduction, Eh, à l'aide d'une électrode platine qui est référencée à une électrode normale à hydrogène. Le pH, en effet, est un paramètre bien défini pour établir l'intensité des réactions de transferts de protons, H^+ , et l'électrode de pH est une surface hydroxylée d'une membrane de verre autour de laquelle s'établit très rapidement un équilibre entre l'eau et le pH, et les mesures sont reproductibles.

Mais les équilibres rédox, référencés par rapport à l'électrode normale à hydrogène, mettent en jeu des électrons qui ne peuvent pas circuler librement dans le milieu aqueux. Par conséquent le pe d'une solution aqueuse ne réfère pas à une entité chimique réelle, mais décrit la tendance de composés réactifs à accepter ou à donner des électrons. Cela implique qu'un donneur et un accepteur d'électrons deviennent proches voisins pour qu'il y ait réaction. Ainsi la caractérisation de l'état rédox d'une solution aqueuse sera obtenue par l'association aux mesures de Eh par l'électrode de platine, de mesures des activités de certains couples rédox, comme Fe^{2+}/Fe^{3+} , H_2/H_2O ou H_2S/SO . Concrètement, ces dernières s'obtiennent par la mesure *in situ* (cadre page suivante) de la concentration en solution des espèces réduites du fer et du soufre par colorimétrie.

La nutrition minérale du riz

Les racines absorbent les éléments minéraux majeurs sous la forme de cations ou d'anions comme : NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , $H_2PO_4^-$ et SO_4^{2-} . La somme des charges absorbées par la plante est largement dominée par l'absorption de NH_4^+ et K^+ , et donc positive. Cela entraîne un déséquilibre électrique local entre l'intérieur et l'extérieur de la plante. Pour que la neutralité électrique soit respectée, la plante émet des protons vers le sol pour compenser chaque cation absorbé. Par rétroaction, cette émission d'acides par la plante contribue à l'acidification de la partie du sol explorée par les racines – la rhizosphère –, et à l'hydrolyse des minéraux altérables (e.g. un aluminosilicate de calcium comme l'anorthite), donc à la mise en solution d'éléments minéraux que la plante peut alors absorber.

Dans le cas de la rizière qui est fortement exportatrice de biomasse (plusieurs tonnes par hectare), la nutrition minérale se réalise à partir du sol selon les mécanismes décrits ci-

dessus mais aussi à partir des apports en cations et anions présents naturellement dans les eaux d'irrigation qui sont régulièrement renouvelées tout au long de la culture. La production de riz est exportatrice nette d'éléments minéraux hors de la parcelle car seule une partie est compensée par les apports d'engrais (Barbier, ce volume p. 161). Il en résulte que le sol se transforme (Trolard et al., ce volume p. 185).

L'acquisition de données sur les eaux et les sols de la rizière

Mesures sur les eaux

Un suivi *in situ* de variables caractérisant l'eau au cours du développement de la culture a été effectué pendant plusieurs années (2001-2009) dans les rizières de Camargue. Il est fondé sur l'utilisation de sondes océanographiques (fig.E1) qui permettent de mesurer au pas de temps horaire, la température, le pH, le potentiel d'oxydoréduction et la conductivité électrique. Ces sondes ne sont opérationnelles que dans des milieux saturés en eau, aussi les mesures ont été réalisées à 1,60 m de profondeur dans la nappe sous les rizières, dans l'horizon de labour et dans la lame de submersion pendant plusieurs saisons rizicoles.

Pour compléter ces enregistrements, des campagnes d'échantillonnage des eaux ont été réalisées pour analyser l'évolution des teneurs en anions et cations majeurs, au cours du temps, à la fois dans la lame de submersion (LS) et dans le sol inondé au-dessus de la semelle de labour (SI). Ces campagnes se déroulaient sur des périodes de 14 h (7 h - 21 h) à différents stades de développement du riz (e.g. floraison) avec des échantillons prélevés dans LS et SI toutes les heures.

Sur le terrain, on mesure la température, le pH, le potentiel d'oxydoréduction Eh, la conductivité électrique, et les concentrations des éléments susceptibles de s'oxyder à l'air comme le fer ferreux, le nitrite, les sulfites... Trois aliquotes sont conditionnées sur le terrain, dont une est acidifiée pour la mesure des cations par absorption atomique, une est utilisée pour les mesures de l'alcalinité par acidimétrie et de la silice dissoute par spectrométrie UV-visible et la troisième pour la mesure des anions par chromatographie ionique. Ces aliquotes sont stockées dans une glacière à 4 °C entre le prélèvement sur le terrain et les analyses au laboratoire.

Mesures sur les sols de rizière

Des caractérisations physiques, minéralogiques et géochimiques ont été réalisées pendant plusieurs années (2001-2009). Ainsi, ont été déterminés la granulométrie, l'organisation spatiale des horizons de sols par mesure du potentiel spontané, le statut rédox par test colorimétrique, la minéralogie des argiles par diffraction des rayons X, les concentrations en terres rares et les isotopes radiogéniques.



Figure E1. Sonde océanographique multiparamétrique et son tube support pour pouvoir l'installer dans la rizière (Cary 2005)

DES MILIEUX SOL ET EAU DE RIZIÈRE FORTEMENT DYNAMIQUES

La forte dynamique de croissance du riz au cours d'un cycle cultural se traduit par des réactions des milieux sol et eau de la rizière. Les phénomènes les plus marquants que nous ayons pu observer sont :

- des dynamiques saisonnières et événementielles Eh-pH dans les eaux souterraines de la rizière ;
- la mise en place d'un état réducteur du sol cultivé après l'inondation des rizières ;
- l'effet de tampon thermique du développement foliaire du riz sur la température des eaux dans l'agrosystème ;
- des dynamiques horaires de prélèvement d'éléments minéraux par la plante impactant la solution du sol et l'eau de la lame de submersion ;
- un effet d'acidification massif de la rhizosphère avant la floraison du riz ;
- la mise en évidence de cinétiques réactionnelles abiotiques et biotiques dans la « digestion » des engrais azotés.

Dans la suite, nous insisterons sur les dynamiques saisonnières et événementielles dans les eaux souterraines de la rizière, la dynamique horaire de prélèvement des éléments chimiques par le riz et la mise en évidence de cinétiques abiotiques et biotiques dans la « digestion » des engrais azotés.

Dynamiques Eh-pH et géochimiques dans les eaux souterraines

La figure 2 présente le diagramme Eh-pH de l'ensemble des mesures de pH et Eh obtenues sur une année hydrologique, d'octobre 2002 à septembre 2003.

Pendant la période de production du riz où les rizières sont irriguées (partie 1 de la figure 2), le niveau de la nappe souterraine est constant et se trouve à 80 cm de profondeur. Le pH varie de 7 à 8,7 et le potentiel d'oxydoréduction chute de -200 mV à -270 mV et peut atteindre des valeurs encore plus négatives, jusqu'à -380 mV, pendant les périodes de préfloraison (juin) et de floraison (jusqu'à mi-juillet). Il remonte ensuite à des valeurs voisines de -220 mV pendant le mûrissement du grain et la sénescence de la plante jusqu'à la récolte (de fin juillet à fin septembre).

Pendant la période où les rizières n'étaient pas irriguées (parties 2 et 3 de la figure 2), le niveau de la nappe a varié entre 80 et 170 cm de profondeur. Cela a eu comme conséquence la mise hors d'eau de la sonde pendant une partie de l'hiver et donc l'absence de mesures. Lorsque le sol est inondé, le pH fluctue entre 6,5 et 7,3 et le potentiel d'oxydoréduction reste très stable entre -180 et -220 mV sauf pendant un épisode d'orage (le

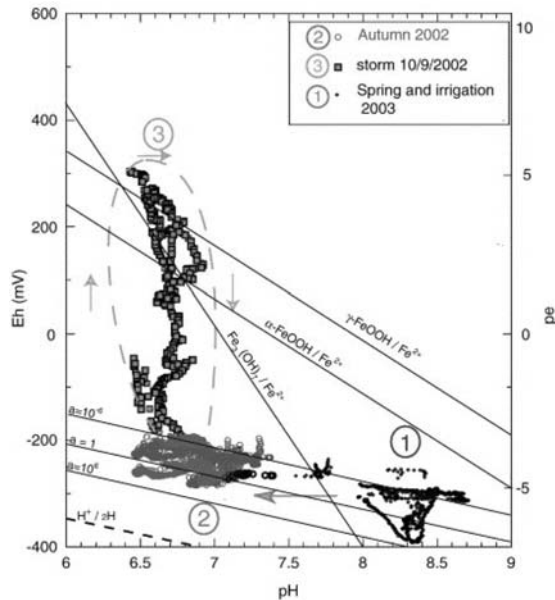


Figure 2. Diagramme des mesures de Eh et pH, enregistrées dans les sols inondés sous la rizière pendant l'année hydrologique 2002-2003 (d'après Cary & Trolard 2006). $a = \text{SO}_4^{2-}/\text{S}^{2-}$

10 septembre 2002). Cet événement (partie 3 de la figure 2), de forte intensité sur une courte période, a entraîné une variation de pH de plus d'une unité et une large fluctuation du potentiel d'oxydoréduction entre -220 mV et +350 mV en quelques heures, qui s'explique par l'infiltration rapide de grandes quantités d'eau de pluie saturées en oxygène jusqu'à la nappe où est implantée la sonde. Le système ensuite se relaxe et revient à l'état stationnaire de la période non irriguée, 3 à 4 jours après cet événement.

Les conséquences de ces dynamiques saisonnières Eh et pH sur les sols sous la rizière s'interprètent à partir du calcul des indices de saturation des eaux par rapport aux minéraux présents dans le sol (Cary & Trolard 2006, Cary & Trolard 2008). On montre ainsi que, bien que la Camargue soit un système sédimentaire carbonaté¹, les eaux dans les sols sous la rizière sont sous-saturées par rapport à la calcite, la dolomite et la magnésite en période non irriguée et sursaturées en période irriguée. Cela signifie que durant la période où les rizières ne sont pas irriguées – périodes hors production du riz –, ces minéraux se dissolvent, alors que lorsqu'il y a production du riz, ces minéraux sont protégés de la dissolution.

¹ Tous ces sols réagissent par effervescence à l'acide chlorhydrique (HCl).

Ces résultats associés à des mesures de teneur en soufre dans l'eau montrent aussi que, quelle que soit la période de l'année, le milieu est tamponné par l'équilibre $\text{SO}_4^{2-}/\text{S}^{2-}$ et ce, même au cours des épisodes réducteurs les plus sévères (de l'ordre de -400 mV).

Cela s'explique par le voisinage marin des rizières, qui contribue à l'apport massif de sulfates par l'eau de mer infiltrée dans les eaux souterraines et par les pluies (embruns), ce qui assure ainsi un effet tampon rédox robuste face au risque de méthanisation du milieu. En effet, il faut en principe épuiser les sulfates par la respiration anaérobie avant que la microflore n'utilise le CO_2 comme accepteur d'électrons, or les sulfates sont présents en abondance et constamment renouvelés.

Dynamiques horaires (température-pH-Eh) et prélèvement des éléments chimiques par le riz

Pour construire sa biomasse, le riz prélève comme tout végétal vasculaire supérieur, du carbone à partir de l'air, et de l'azote, du phosphore et du potassium à partir de la solution du sol. Mais au-delà de cette trilogie classique en agronomie, la cellule végétale élémentaire a besoin au minimum d'une vingtaine d'autres éléments chimiques pour assurer les fonctions métaboliques de base. En étudiant la dynamique horaire de la composition chimique des eaux dans la rhizosphère, nous avons pu observer la vie animée du riz au cours d'un cycle de culture.

La figure 3 montre les variations de la température, du pH et du potentiel rédox Eh entre la mise en eau d'une rizière et la récolte au cours de l'année 2004 enregistrées avec des sondes océanographiques multiparamétriques (cadre page 196). On observe ainsi :

- une atténuation significative des amplitudes journalières de la température liée au développement foliaire du riz créant localement un environnement thermique tamponné ;
- des variations importantes de pH et de Eh qui correspondent à la succession d'assecs pratiqués par l'agriculteur en début de saison (en mai) pour éradiquer le riz sauvage et une invasion de nématodes ;
- la mise en place d'un milieu réducteur en continu de juin à septembre et un épisode d'acidification significatif de la solution du sol (diminution de pH jusqu'à 4,5) en périodes de préfloraison et de floraison du riz.

À partir des analyses chimiques réalisées au pas de temps horaire sur quelques journées, on observe que le riz, sur un cycle de 24 heures, respire, se nourrit, réalise la photosynthèse et sommeille. Cette activité biologique, à laquelle s'ajoute celle des micro-organismes du sol, modifie directement ou indirectement la chimie des eaux. La vie quotidienne du riz pendant la montaison s'organise ainsi en plusieurs phases :

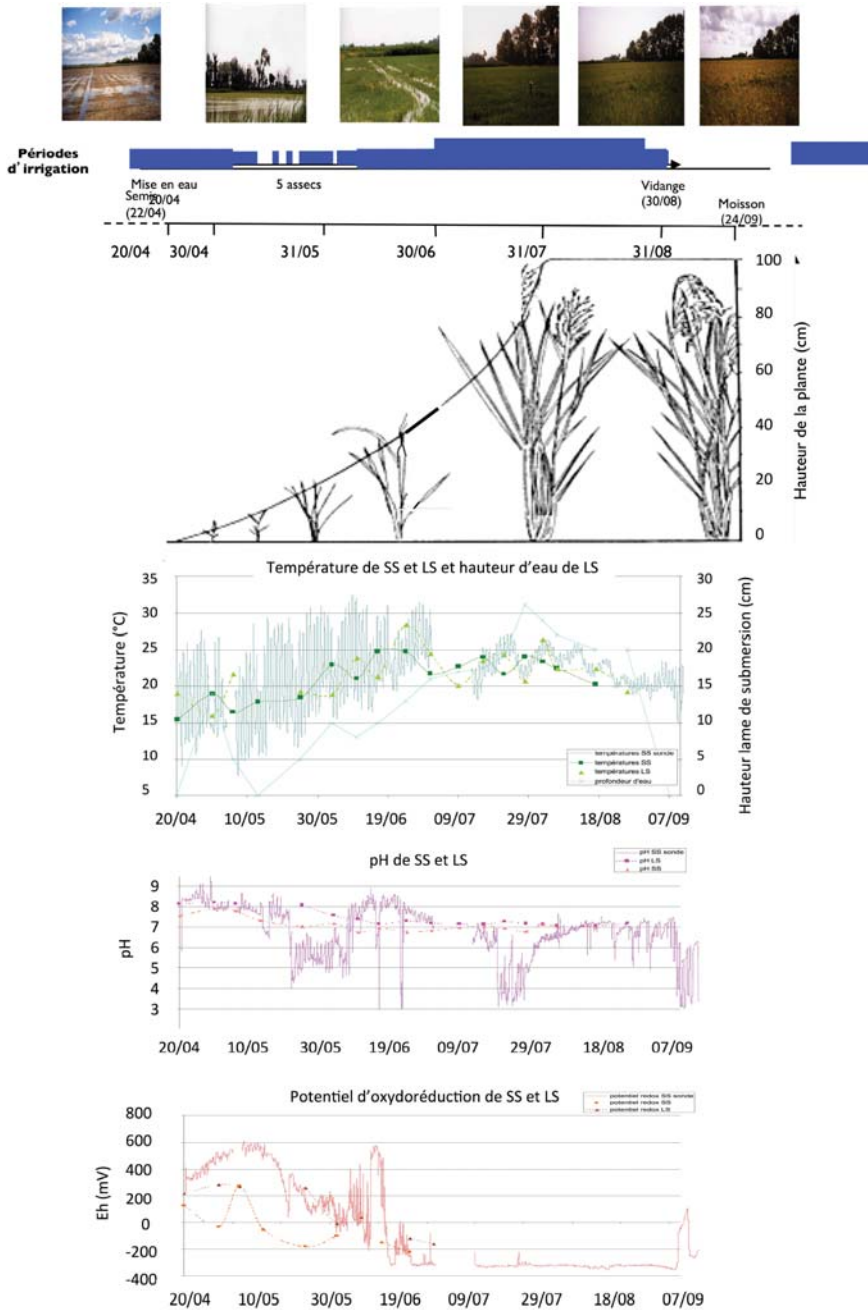


Figure 3. Enregistrements « haut débit » de la température, du pH et du Eh dans la solution du sol (SS) à 40 cm de profondeur et mesures ponctuelles des mêmes variables dans la solution du sol (SS) et dans la lame d'eau de submersion (LS) pendant une année de culture de riz en 2004

- du lever du soleil jusque vers 10 heures, où le riz absorbe le potassium, le fer et le manganèse ;
- de 10 heures jusqu'au coucher du soleil, où le riz se gave de silicium, de soufre, d'azote, de potassium, de sodium, de magnésium et de calcium au point même de créer des dépressions de ces éléments dans les eaux de la lame de submersion (en particulier pour l'ammonium, le silicium et le potassium), permettant ainsi à la plante de constituer des réserves nutritives ;
- du coucher du soleil au lever du soleil où la plante respire et où les interactions solution-plante sont les moins actives.

En période de préfloraison et de floraison du riz, on observe une augmentation significative de ces prélèvements diurnes d'éléments qui vont jusqu'à une acidification temporaire de la rhizosphère, au voisinage de pH 4,5 alors que l'ambiance géochimique des sols en Camargue est plutôt carbonatée (pH 7-8) (fig.3). Cette excrétion massive de protons par la plante permet de constituer des réserves nutritionnelles importantes. Elle permet aussi de déstabiliser la gangue d'oxydes de fer et manganèse (fig.4) et ainsi d'augmenter leur biodisponibilité. Cette gangue se forme au voisinage des racines, à l'interface du milieu externe en conditions réductrices anaérobies et dans l'espace immédiatement voisin de la racine où les aerenchymes du riz apportent de l'oxygène de l'air qui assure la vie aérobie des micro-organismes du sol. Sur 100 protons excrétés par le riz, 90 le sont pendant la période de préreproduction (Begg et al. 1994). Le plant de riz alors gorgé d'éléments nutritifs peut ensuite fleurir et former ses fruits. Le grain grossit tandis que la plante se dessèche et n'entretient plus d'activité significative dans la rhizosphère.

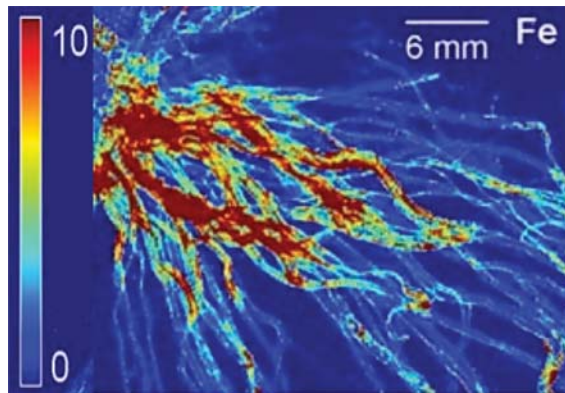


Figure 4. Précipitation de fer (en rouge) sur le chevelu racinaire du riz (source: Seyfferth et al. 2010)

Les concentrations en éléments dans la solution du sol restent quasi constantes dans le temps, le pH redevient alcalin, le potentiel d'oxydoréduction est moins élevé, indiquant une diminution significative de l'activité des micro-organismes du sol; l'activité biologique est alors marquée par le développement d'algues dans la lame de submersion.

Cinétiques de « digestion » d'engrais azotés

Au cours de la culture du riz, des engrais azotés de type urée sont apportés. L'urée est dégradée dans le sol et l'azote absorbé sous forme d'ammonium par la plante. L'apport d'urée entraîne une augmentation du pH selon la réaction :



Cette réaction est catalysée par l'uréase. Le pH revient ensuite à la valeur de l'état stationnaire initial, proche de 7, suivant une cinétique exponentielle (fig.5a). Le signal de retour à l'état initial est dans le détail modulé par des variations nyctémérales avec une signature dissymétrique² (fig.5b).

Pendant les semaines qui suivent l'épandage de l'engrais, la température et le pH sont en opposition de phase au cours de la journée³: le pH est maximum très tôt le matin, avant le lever du soleil, quand la température est minimum; il diminue lentement ensuite avec l'élévation de la température durant l'après-midi. L'hydrolyse de l'urée, qui est un processus abiotique, se déroule également jour et nuit, tandis que l'absorption de NH_4^+ par le riz ne se fait que le jour, quand la transpiration est active (Nawaz 2010). Les temps de relaxation du pH sont de 3,5 à 11 heures pour les oscillations nyctémérales. Ils sont de plusieurs centaines d'heures pour la relaxation générale entre le moment d'introduction de l'urée dans la rizière et sa digestion par le milieu.

Avec ces résultats, on obtient pour la première fois la cinétique de réaction *in situ* de l'urée dans la rizière, démontrant que l'apport d'engrais est « digéré » par réactions abiotique et biotique par le milieu en 3 semaines (soit environ 1200 heures).

² On observe une augmentation brutale suivie d'une décroissance exponentielle.

³ Résultats obtenus par une transformée de Fourier du signal enregistré au pas de temps horaire avec la sonde multiparamétrique.

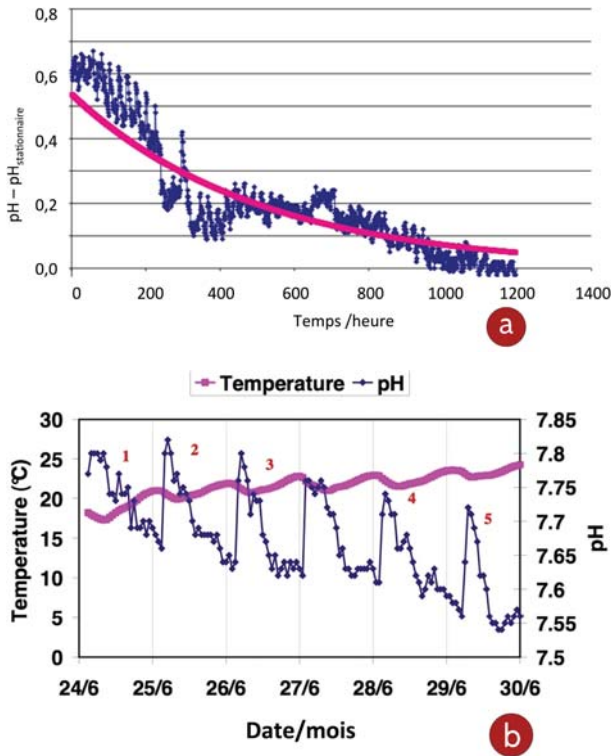


Figure 5. Dans la solution du sol des rizières: a) cinétique de relaxation du pH suite à l'apport d'urée; b) oscillations nycthémerales de la température et du pH (d'après Nawaz 2010)

CONCLUSION

Les mesures obtenues démontrent que la rizière est un système très dynamique. La salinité (*i.e.* la conductivité électrique), le pH, le potentiel d'oxydoréduction varient saisonnièrement très largement. À ces variations du premier ordre, se surimposent d'autres variations, de fréquence plus grande, comme les variations nycthémerales liées à l'activité biologique du riz, à l'hydrolyse de l'urée, au tampon pH des carbonates des sols... La microflore du sol est donc soumise à de grandes variations des paramètres du milieu: 2 à 4 unités pH, 7 à 11 unités pe, et ce sont des unités logarithmiques! Le tableau est donc très différent de ce que laisse penser une analyse de terre moyenne et de son interprétation « classique » pour la conduite de cultures de céréales. La non-maîtrise de ces variables physico-chimiques du milieu pourrait expliquer en partie la non-maîtrise et la variabilité des rendements observés.

L'utilisation de sondes océanographiques en milieu rizicole permet d'enregistrer au pas de temps horaire plusieurs paramètres physico-chimiques dans les eaux : la température, le pH, le potentiel d'oxydoréduction et la conductivité électrique. En combinant ces données avec celles acquises sur la composition chimique des eaux, au même pas de temps, sur des journées cibles du cycle végétal (fin de montaison, floraison...), et la modélisation géochimique, une dynamique nyctémérale des processus physico-chimiques est mise en évidence avec une absorption sélective des éléments chimiques par le riz selon l'heure du jour et suivant son état de développement. Plus généralement, dans la rizière et sous la rizière, les mesures *in situ* à haut débit temporel permettent de déterminer la cinétique des principales réactions mises en jeu et de déterminer si elles sont abiotiques ou biotiques. Aussi les outils de suivi de dynamiques *in situ* en continu, utilisés dans cette étude, ont-ils montré leur efficacité et devraient-ils à terme permettre d'affiner la conduite des rizières. La miniaturisation de l'électronique, la baisse du coût des capteurs, la transmission des données par les nouvelles technologies de communication font qu'il est aujourd'hui possible d'ausculter en permanence la solution du sol au contact des racines ou loin des racines, et par de simples mesures de pH, pe, température et conductivité, d'obtenir des informations en temps réel sur les processus biotiques.

En Camargue, et plus généralement dans toutes les rizières situées en bord de mer, les apports de sulfate empêchent les phénomènes de réduction d'aller jusqu'à la production de méthane, puissant gaz à effet de serre. Le riz par ses aérénchymes est adapté à la vie en milieu anoxique. La durabilité du système de culture est assurée tant que les exportations d'éléments nutritifs (sels minéraux) sont compensées (Barbier, ce volume p. 161, Ari Tchougoune & Mouret, ce volume p. 177, Trolard et al., ce volume p. 185).

La dynamique enregistrée pour le riz est probablement aussi à l'œuvre pour d'autres plantes cultivées. Une des clés de l'amélioration de la conduite de la culture du riz consistera pour l'agronome à mieux maîtriser les conditions rédox du milieu.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier l'Union européenne (Feder) qui, via l'ACI « Écologie quantitative », a contribué à financer ces travaux, le ministère de l'Éducation nationale et de l'Enseignement supérieur pour la bourse de thèse de Lise Cary, la High Education Commission du gouvernement pakistanais pour le support financier du Master 2 et du doctorat de Muhammad Farrakh Nawaz, Monique Mayor et Pierre Moreau pour leur aide à l'acquisition de données sur le terrain et au laboratoire et enfin Xavier Guillot du domaine de la Méjanes en Camargue pour l'accès à ses champs et nos nombreuses et enrichissantes discussions.

RÉFÉRENCES

- Ari Tchougoune M., Mouret J.-C., 2018. « Pour une gestion économe de la fertilisation phosphatée des rizières », in Mouret J.-C., Leclerc B. (coord.), *Le Riz et la Camargue. Vers des agroécosystèmes durables*, Cardère - Educagri: 177-184.
- Barbier J.-M., 2018. « Améliorer l'efficacité de la fertilisation azotée des rizières », in Mouret J.-C., Leclerc B. (coord.), *Le Riz et la Camargue. Vers des agroécosystèmes durables*, Cardère - Educagri: 161-175.
- Begg C., Kirk G., MacKenzie A., Neue H.U., 1994. "Root-induced iron oxidation and pH changes in the lowland rice rhizosphere", *New Phytologist* 128(3): 469-477.
- Bourrié G., Lelong F., 1994. « Les solutions du sol: du profil au bassin-versant », in Bonneau M., Souchier B. (ed.), *Pédologie, tome 2: Constituants et propriétés du sol*, 2^e édition, Paris, Masson: 239-273.
- Cary L., 2005. *Mobilité des éléments selon les alternances aérobie-anaérobie dans un écosystème rizicole en Camargue*. Thèse doct. Sci. Environnement, univ. Aix-Marseille, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00186875/>.
- Cary L., Trolard F., 2006. "Effects of irrigation on geochemical processes in a paddy soil and in groundwaters in Camargue (France)", *J. Geochemical Exploration* 88(1-3): 177-180.
- Cary L., Trolard F., 2008. "Metal mobility in the groundwater of a paddy field in Camargue (South eastern France)", *J. Geochemical Exploration* 96(2-3): 132-143.
- Irfan K., Trolard F., Shahzad T., Cary L., Mouret J.-C., Bourrié G., 2017. "Impact of 60 years on intensive rice cropping on clay minerals in soils due to Si exportation", *Amer. J. Agriculture & Forestry* 5(3): 40-48.
- Meharg C., Meharg A.A., 2015. "Silicon, the silver bullet for mitigating biotic and abiotic stress, and improving grain quality, in rice?", *Environmental and Experimental Botany* 120: 8-17.
- Nawaz M.F., 2010. *Geochemistry of hydromorphic soils and water under rice culture and forest - continuous measurements, thermodynamic modelling and kinetics*. Thèse doct. Sci. Environnement, univ. Aix-Marseille, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00547449/>.
- Seyfferth A.L., Webb S.M., Andrews J.C., Fendorf S., 2010. "Arsenic Localization, Speciation, and Co-occurrence with Iron on Rice (*Oryza sativa* L.) Roots having Variable Fe Coatings", *Environmental Science & Technology* 44: 8108.
- Trolard F., Irfan K., Shahzad T., Bourrié G., 2018. « La silice, un élément essentiel à gérer pour le riz », in Mouret J.-C., Leclerc B. (coord.), *Le riz et la Camargue. Vers des agroécosystèmes durables*. Cardère - Educagri: 185-192.

POUR CITER CE CHAPITRE

Trolard F., Bourrié G., Cary L., Nawaz M.F., 2018. « Dynamiques biogéochimiques en rizière. Les apports du monitoring *in situ* », in Mouret J.-C. & Leclerc B. (coord.), *Le Riz et la Camargue. Vers des agroécosystèmes durables*. Cardère - Educagri: 193-205.

AFFILIATIONS DES AUTEURS

Fabienne TROLARD, Inra-UAPV, UMR 1114 Emmah, Avignon, France, fabienne.trolard@inra.fr

Guilhem BOURRIÉ, Inra-UAPV, UMR 1114 Emmah, Avignon, France, guilhem.bourrie@inra.fr

Lise CARY, BRGM, DR Hauts-de-France, Lille, France, l.cary@brgm.fr

Muhammad Farrakh NAWAZ, Department of Forestry & Range Management, Government College University Faisalabad, Faisalabad, Pakistan, kf_uaf@yahoo.com

SOMMAIRE

| | |
|---|----|
| <i>Remerciements</i> | 5 |
| <i>Préface</i> – Alfred Philippe Conesa, président honoraire d’Agropolis international..... | 11 |
| <i>Introduction</i> – Jean-Claude Mouret, Bernadette Leclerc..... | 17 |

PARTIE I – LA CAMARGUE, LA RECHERCHE AGRONOMIQUE ET LA FORMATION

| | |
|--|----|
| <i>Le riz et la Camargue: une coexistence nécessaire mais fragile</i> Jean-Claude Mouret..... | 35 |
| <i>Un diagnostic agronomique régional pour expliquer la variabilité des rendements du riz et programmer des actions de recherche</i> – Jean-Claude Mouret, Jean-Marc Barbier, Roy Hammond, Sylvestre Delmotte, Françoise Ruget..... | 55 |
| <i>Le point de vue des riziculteurs camarguais sur la durabilité</i> Ronan Le Velly, Roy Hammond, Jean-Claude Mouret..... | 73 |
| <i>La Camargue rizicole: un laboratoire à ciel ouvert pour former des ingénieurs agronomes</i> Isabelle Michel, Jean-Marc Barbier, Jean-Claude Mouret..... | 85 |
| <i>La Camargue: un terrain d’apprentissage pour l’agroécologie dans un territoire</i> Jean-François Vian, Nathalie Cassagne, Caroline Mazaud..... | 97 |

PARTIE II – LES CONDITIONS AGRONOMIQUES DE LA CULTURE DU RIZ

| | |
|--|-----|
| <i>Les exigences de la conduite d’une rizière en Camargue</i> – Jean-Claude Mouret..... | 109 |
| <i>La germination et la levée: des phases très critiques pour l’élaboration du rendement du riz</i> – Jean-Marc Barbier..... | 125 |
| <i>La gestion des adventices du riz: une préoccupation agronomique majeure</i> Pascal Marnotte, Cyrille Thomas..... | 145 |
| <i>Améliorer l’efficacité de la fertilisation azotée des rizières</i> Jean-Marc Barbier..... | 161 |
| <i>Pour une gestion économe de la fertilisation phosphatée des rizières</i> Mamadou Ari Tchougoune, Jean-Claude Mouret..... | 177 |

| | |
|--|-----|
| <i>La silice, un élément essentiel à gérer pour le riz</i> | |
| Fabienne Trolard, Kamran Irfan, Tanvir Shahzad, Guilhem Bourrié..... | 185 |
| <i>Dynamiques biogéochimiques en rizière. Les apports du monitoring in situ</i> | |
| Fabienne Trolard, Guilhem Bourrié, Lise Cary, Muhammad Farrakh Nawaz..... | 193 |
| <i>Amélioration variétale du riz en Camargue: sélection pour les caractères climato-dépendants</i> | |
| Axel Labeyrie, Arnaud Boissard, Guy Clément, Didier Louvel, Jean-Louis Seguy..... | 207 |

PARTIE III - LA GESTION TECHNIQUE DES EXPLOITATIONS RIZICOLES

| | |
|---|-----|
| <i>Comprendre et modéliser les décisions d'assolement des riziculteurs</i> | |
| Jean-Marc Barbier, Florine Mailly, Sylvestre Delmotte, Noémie Schaller, Jean-Claude Mouret, Santiago López Ridaura..... | 225 |
| <i>Associer des céréales et des légumineuses à bas niveau d'intrants: un atout pour les agroécosystèmes rizicoles en Camargue</i> | |
| Santiago López Ridaura, Jean-Claude Mouret, Philippe Hinsinger..... | 239 |
| <i>Les récents progrès de la mécanisation en riziculture camarguaise</i> | |
| Gilbert Lannes..... | 253 |
| <i>La place de l'élevage dans les exploitations rizicoles en Camargue</i> | |
| Anne Vadon..... | 263 |
| <i>La paille de riz en Camargue: du sous-produit au coproduit</i> | |
| Christelle Monier, Jean-Claude Mouret, Anne Vadon, Christophe Soulard..... | 273 |

PARTIE IV - LES FILIÈRES RIZICOLES EN CAMARGUE

| | |
|---|-----|
| <i>Riz de Camargue: la construction fragile mais prometteuse de filières de qualité et d'origine</i> – Jean-Marc Touzard..... | 297 |
| <i>Les firmes rizicoles en Camargue: origine, diversité et évolution</i> | |
| Geneviève Nguyen, François Purseigle..... | 315 |
| <i>Impacts économiques des politiques publiques sur la dynamique de développement de la riziculture</i> – Mélanie Jaeck..... | 331 |