

Influence de substrats organiques sur la cinétique bactérienne d'oxydation de l'arsenic III

Tiffanie Lescure, Catherine Joulian, Pascale Bauda, Catherine Hénault,
Fabienne Battaglia-Brunet

► **To cite this version:**

Tiffanie Lescure, Catherine Joulian, Pascale Bauda, Catherine Hénault, Fabienne Battaglia-Brunet. Influence de substrats organiques sur la cinétique bactérienne d'oxydation de l'arsenic III. 10ème Séminaire de l'École Doctorale RP2E, Jan 2013, Nancy, France. p. 32. hal-00798288

HAL Id: hal-00798288

<https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-00798288>

Submitted on 8 Mar 2013

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.

INFLUENCE DE SUBSTRATS ORGANIQUES SUR LA CINÉTIQUE BACTÉRIENNE D'OXYDATION DE L'ARSENIC III

Tiffanie Lescure^{1,2}, Catherine Joulian¹, Pascale Bauda², Catherine Hénault³ et Fabienne Battaglia-Brunet¹

¹ BRGM, ISTO, UMR 7327, BP 36009, 45060 Orléans

² LIEC UMR 7360 Université de Lorraine CNRS, Campus Bridoux, 8 rue du Général Delestraint, 57070 Metz

³ INRA, Centre de Recherche d'Orléans, Unité de Science du Sol, 2163 avenue de la Pomme de Pin, CS 40001 Ardon, 45075 Orléans

Résumé. La microflore des sols joue un rôle majeur dans le comportement des éléments métalliques et métalloïdes. Certaines bactéries sont ainsi capables d'oxyder l'AsIII en AsV, moins toxique et moins mobile. Des travaux effectués avec des bactéries AsIII-oxydantes dans le cadre de différents projets indiquent un effet très significatif de la matière organique sur l'activité de ces micro-organismes en aérobie. La matière organique apparaît comme ralentissant la transformation de l'AsIII en AsV par les bactéries en condition aérée. L'objectif de ce travail a été d'estimer l'influence d'un apport d'extrait de levure sur la spéciation de l'arsenic par (1) deux souches bactériennes AsIII-oxydantes (*H. arsenicoxydans* et *T. delicata*) et (2) la microflore de sols pollués. Des résultats préliminaires suggèrent un effet significatif de la concentration en extrait de levure sur la cinétique d'oxydation de l'arsénite par les deux souches bactériennes. La présence de substrat organique pourrait inhiber le processus d'oxydation, parce que les bactéries métaboliseraient les substrats les plus intéressants du point de vue énergétique. Il est aussi possible qu'en présence de matière organique, le système Ars de réduction de l'AsV soit plus actif et entre en compétition avec le système Aio d'oxydation de l'AsIII, induisant une vitesse d'oxydation globale plus faible. Des expérimentations conduites sur les communautés bactériennes de six sols pollués ont montré une oxydation plus lente de l'AsIII pour les deux sols les plus faiblement contaminés en As. Ceci a permis de mettre en évidence une relation entre la contamination *in situ* en As et le comportement de la communauté microbienne d'oxydation de l'arsénite. Ces résultats pourraient être dus à une plus grande tolérance des bactéries vis-à-vis de l'As dans les sols ayant les plus hautes teneurs en As, ou bien à une « sélection » de bactéries AsIII-oxydantes autotrophes. La teneur en carbone organique du sol semble influencer les cinétiques d'oxydation de l'AsIII : dans les sols à faible teneur en carbone organique (< 1,4 %), l'oxydation se trouverait stimulée par un amendement en extrait de levure, alors que dans les sols à haute teneur en carbone organique (> 1,4 %), un ajout d'extrait de levure semble ralentir voire inhiber l'oxydation de l'arsénite. Cet ajout de substrat organique à la matière organique déjà présente dans le sol aurait pour effet d'atteindre un seuil inhibiteur pour les sols les plus riches. Les structures des communautés microbiennes des sols étaient aussi probablement d'ores et déjà différentes compte tenu des concentrations originales en matière organique.

INTRODUCTION

L'arsenic (As) est un métalloïde appartenant au groupe Va de la classification périodique des éléments. L'arsenic inorganique est trouvé dans l'environnement sous quatre états d'oxydation : l'arsine (As-III), l'arsenic natif (As 0), l'arsénite (AsIII) et l'arséniate (AsV). La proportion relative de ces états d'oxydation est étroitement liée à des mécanismes de transformation microbiens et aux caractéristiques physico-chimiques du milieu (pH, potentiel d'oxydo-réduction Eh...). Dans l'environnement, les espèces inorganiques prédominantes de l'arsenic sont l'arsénite et l'arséniate.

La mobilité de l'arsenic est principalement déterminée par des processus au niveau des surfaces minérales, et en particulier à des phénomènes de précipitation, dissolution, et ad-/désorption. A des pH neutres, en conditions oxygénées, l'arsenic est

majoritairement présent sous forme d'AsV, et immobilisé par les oxydes métalliques [1].

1. Les interactions arsenic/matières organiques dans les sols

La matière organique dissoute (MOD) est définie comme la matière organique présente dans la solution de sol et passant par les filtres à 0,4-0,6 µm. Elle est constituée d'une « association hétérogène de substances macromoléculaires amorphes, assez mal définies au niveau moléculaire, avec un grand nombre de fonctionnalités chimiques diverses » [2]. Environ 20 % de la MOD consiste en des hydrates de carbone, des acides carboxyliques, des acides aminés et d'autres acides organiques identifiables. Les 80 % restants sont formés par les acides humiques et fulviques [3].

La matière organique pourrait influencer la mobilité de l'arsenic de diverses façons :

- en formant avec cet élément, des complexes solubles maintenant l'arsenic en solution dans la phase aqueuse [4-5],
- en modifiant sa spéciation : Redman et al. [5] ont mis en évidence qu'un ajout de matières organiques naturelles (NOM) avait pour conséquence de modifier l'état d'oxydation de l'arsenic, principalement dans le sens d'une réduction de l'arséniate en arsénite, augmentant ainsi la mobilisation d'arsenic des oxydes de fer vers les eaux interstitielles,
- en entrant en compétition avec l'arsenic pour les sites de sorption sur les matériaux du sol, et les oxydes de fer en particulier. Or, les oxydes de fer sont les principaux pièges de l'arsenic dans les sols. Bauer et Blodau [6] ont ainsi montré qu'un apport de matière organique induisait une mobilisation de l'arsenic du sol vers les eaux interstitielles.
- en réduisant les oxydes de FeIII et de MnIII ou IV sur lesquels l'As est souvent adsorbé, influençant, de façon indirecte, la mobilité de l'arsenic.

Toutefois, jusqu'à présent, la plupart des études portant sur l'influence de la matière organique du sol sur la mobilité de l'arsenic n'a porté que sur des processus abiotiques.

2. Les transformations bactériennes de l'arsenic

La microflore des sols joue un rôle majeur dans le comportement des éléments métalliques et métalloïdes. La spéciation de l'arsenic, en particulier, est liée à l'activité de bactéries capables d'oxyder, de réduire ou de méthyler cet élément, et conditionne son degré de mobilité, de biodisponibilité et de toxicité. Des bactéries capables de modifier l'état d'oxydation de l'arsenic ont été mises en évidence ces dernières années dans la plupart des environnements terrestres et aquatiques [7-12].

Certaines bactéries sont ainsi capables d'oxyder l'AsIII en AsV, moins toxique et moins mobile car il est davantage susceptible d'être piégé ou co-précipité. D'autres peuvent même utiliser la transformation de l'As comme source d'énergie. L'existence de bactéries AsIII-oxydantes est connue depuis les travaux de Green [13] qui, le premier, a isolé *Bacillus arsenoxydans*. De nombreuses souches bactériennes possédant cette capacité ont depuis lors été isolées d'environnements aussi variés que les sols et les sédiments contaminés, les lacs hypersalés, les points chauds géothermiques et les eaux d'égouts. Les bactéries AsIII-oxydantes sont physiologiquement diversifiées. En aérobie, leur métabolisme peut être chimiohétérotrophe, telles que *Herminiimonas*

arsenicoxydans ULPAs1 [14] ou chimioautotrophe comme *Thiomonas delicata* [15] qui utilise l'AsIII comme seul donneur d'électrons pour produire de l'énergie.

Une concordance entre des activités bactériennes AsIII-oxydantes élevées, une grande diversité de gènes *aioA* codant pour la sous-unité catalytique de l'enzyme clé de l'oxydation de l'AsIII, l'arsénite-oxydase, et la présence d'AsV très majoritaire dans l'eau interstitielle du sol a pu être récemment mise en évidence [15]. Certains auteurs ont également suggéré que les gènes de résistance à l'arsenic, gènes *ars* très répandus chez les bactéries et responsables d'une réduction d'AsV libre en AsIII, pourraient contribuer à la mobilisation d'arsenic dans l'environnement.

3. Influence de substrats organiques sur l'oxydation bactérienne de l'AsIII

Des travaux effectués avec des souches bactériennes AsIII-oxydantes dans le cadre de différents projets indiquent un effet très significatif de la matière organique sur l'activité de ces micro-organismes en présence d'oxygène. Des expériences réalisées dans le but d'étudier la colonisation d'un support bactérien (de la pouzzolane) par une communauté bactérienne AsIII-oxydante, dans l'objectif de développer des procédés de traitement d'eau, ont montré que le taux d'oxydation de l'AsIII diminuait de façon significative, de 100 % à 34 % en présence de 4 g.L⁻¹ d'extrait de levure [16]. La matière organique apparaît donc comme ralentissant la transformation de l'AsIII en AsV par les bactéries en condition aérée, c'est-à-dire dans les conditions physico-chimiques classiques d'un sol de surface. Or, dans de telles conditions, il est pour l'instant admis que la réaction biogéochimique prépondérante serait l'oxydation de l'AsIII en AsV. Cette réaction a une importance écologique significative car elle conduit à une stabilisation de l'As dans l'environnement par la formation d'AsV, dont la capacité à s'adsorber sur des phases porteuses telles que les oxydes de fer est bien connue [17].

Huang et al. [18] ont récemment étudié l'effet d'amendements organiques « verts » sur la mobilisation de l'arsenic, sa méthylation et sa volatilisation dans un sol de rizière en condition « inondée ». Ils ont recherché les gènes de fonction bactériens liés à l'arsenic dans leurs microcosmes. Ces auteurs ont mis en évidence un effet significatif de la concentration et du type de matières organiques sur les activités d'oxydation de l'AsIII et de réduction de l'AsV à travers le gène *arsC*. L'ajout de matière organique a eu par ailleurs pour conséquence d'augmenter la méthylation et la volatilisation de l'arsenic dans le sol testé (majoritairement anoxique).

Sur un site pollué, un apport de matière organique peut être préconisé pour améliorer la croissance des plantes dans le cadre d'une opération de phyto-stabilisation. Par ailleurs, dans un contexte de pollution diffuse, les pratiques agricoles d'amendement des sols pourraient avoir un impact sur le transfert d'arsenic, à travers les activités bactériennes, soit vers les eaux souterraines, soit vers les produits alimentaires. Il est donc crucial de pouvoir déterminer dans quelle mesure la concentration et la nature de la matière organique pourraient influencer la mobilité et la biodisponibilité de l'arsenic dans les sols et ainsi son impact dans l'environnement et au niveau sanitaire. L'objectif de ces travaux a donc été d'estimer l'influence de la matière organique sur la spéciation de l'arsenic par la microflore de sols pollués par des méthodes faisant appel à la biogéochimie et la physiologie bactérienne.

EXPERIENCES AVEC LES SOUCHES PURES

Cette expérience doit permettre d'étudier de façon précise l'influence d'un apport d'extrait de levure à différentes concentrations sur l'activité de bactéries AsIII-oxydantes présentant des caractères physiologiques contrastés.

Les micro-organismes choisis pour cette étude sont *Thiomonas delicata* souche *arsenivorans* (T.ars), capable d'utiliser l'AsIII comme seule source d'énergie, et *Herminiimonas arsenicoxydans* qui est parfaitement caractérisée et dont le génome a été séquencé.

Pour la souche *T. delicata* qui est mixotrophe, l'extrait de levure a été testé à des concentrations de 0 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 et 5 g.L⁻¹. Alors que pour la souche *H. arsenicoxydans*, hétérotrophe, les concentrations en extrait de levure étaient de 0,5 ; 2,5 ; 5 ; 10 et 20 g.L⁻¹. Ces gammes de concentrations en substrats ont été choisies en fonction du type de métabolisme des deux souches, considérant que *H. arsenicoxydans* nécessiterait une concentration plus élevée en matière organique. Ces tests préliminaires devaient permettre de déterminer la concentration critique en matière organique susceptible d'avoir un impact sur l'activité AsIII-oxydante des deux souches bactériennes.

Chaque erlenmeyer contenant 90 mL de milieu CAsO1 a été inoculé au 1/10^{ème} par une pré-culture bactérienne cultivée en milieu minimum CAsO1, amendé à 0,2 g.L⁻¹ d'extrait de levure (culture en phase stationnaire). Les expériences ont été réalisées en batch, à une concentration en arsenic de 75 mg.L⁻¹ (soit 1 mM). Les cultures ont été incubées à 25°C sous agitation, afin d'éviter toute limitation par l'oxygène. Un prélèvement de 5 mL de culture a été réalisé quotidiennement. L'échantillon a été filtré à 0,22 µm dans des flacons stériles et stocké à 4°C. L'AsV a été extrait par la méthode PDC/MIBK et analysé par spectrophotométrie d'absorption atomique.

Les résultats préliminaires suggèrent un effet significatif de la concentration en extrait de levure sur la cinétique d'oxydation de l'arsénite par *H. arsenicoxydans* (figure 1). La vitesse d'oxydation de l'AsIII semble augmenter avec la concentration en extrait de levure, de 0,5 à 10-20 g.L⁻¹.

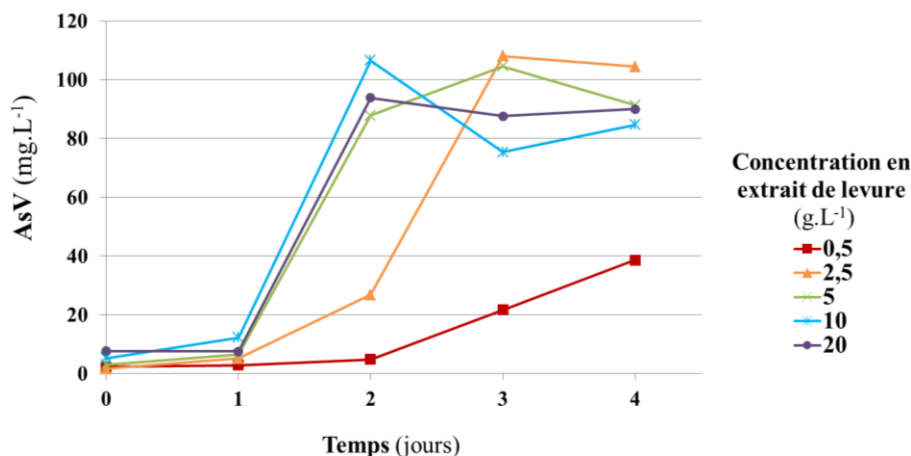


Figure 1. Cinétiques d'oxydation de l'AsIII par *H. arsenicoxydans* avec extrait de levure

La concentration en extrait de levure semble avoir également eu un effet significatif sur la cinétique d'oxydation de l'arsénite par *T. delicata* (figure 2). La concentration optimale en extrait de levure était de l'ordre de 0,2 g.L⁻¹, au-delà de cette concentration, l'extrait de levure semblait ralentir l'oxydation de l'arsénite. En particulier, à la

concentration la plus élevée en extrait de levure (5 g.L^{-1}), l'oxydation de l'arsénite n'a commencé qu'après une latence d'environ 2 jours.

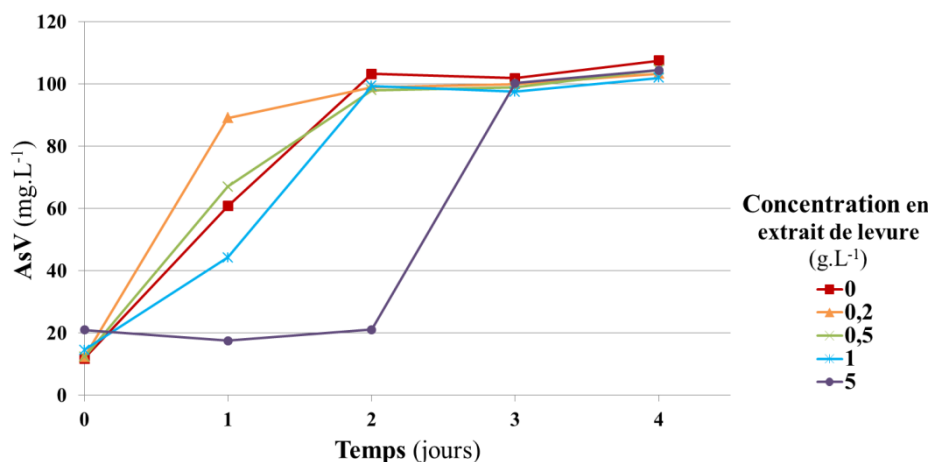


Figure 2. Cinétiques d'oxydation de l'As^{III} par *T. delicata* avec extrait de levure

L'inhibition par la matière organique a été plus prononcée pour la souche mixotrophe (*T. delicata*) que pour la souche hétérotrophe (*H. arsenicoxydans*). Ce résultat est cohérent avec le métabolisme des souches. En tant que souche hétérotrophe, *H. arsenicoxydans* est adaptée à la présence de matière organique en plus haute concentration, tandis que le métabolisme de l'arsenic par la souche mixotrophe *T. delicata* pourrait avoir été affecté par une augmentation de la concentration en matière organique.

Deux hypothèses peuvent être avancées pour expliquer l'influence de la matière organique sur l'activité globale d'oxydation de l'As^{III} par la microflore d'un sol :

- L'arsenic est une source d'énergie potentielle pour les bactéries. Il est possible que la présence de matière organique en tant que substrat énergétique facilement utilisable inhibe le processus d'oxydation tout simplement parce que les bactéries préfèrent métaboliser les substrats les plus intéressants du point de vue énergétique.
- La plupart des bactéries As^{III}-oxydantes possèdent à la fois le système Aio d'oxydation de l'As^{III} et le système Ars qui confère une capacité de résistance à l'arsenic. Or, l'activité du système Ars induit une réduction de l'As^V en As^{III} qui est alors expulsé de la cellule. Le système Ars est consommateur d'énergie, à l'inverse du système Aio qui fournit de l'énergie chez certaines bactéries. Il est donc possible qu'en présence de matière organique, substrat énergétique facilement utilisable, le système Ars soit plus actif et entre en compétition avec le système Aio, induisant une vitesse d'oxydation globale plus faible, voire nulle ou négative (réduction).

EXPERIENCES AVEC LES SOLS

Le même type d'expérimentations a été réalisé afin de tester l'influence de la concentration en extrait de levure sur l'activité d'oxydation de l'As^{III} par les communautés bactériennes de sols pollués. 100 mL de milieu minimum CAsO1, amendés avec $0,2 \text{ g.L}^{-1}$ ou 1 g.L^{-1} d'extrait de levure, ont été inoculés avec l'équivalent

en sol brut humide de 0,2 g de sol sec et tamisé à 5 mm. Une autre concentration (10 g.L⁻¹) a été testée sur l'un des sols d'Auzon (Auzon 1).

Les six sols utilisés proviennent de deux sites différents :

- un site d'une ancienne mine d'or située dans le Limousin : quatre sols ont été échantillonnés dans une prairie, un champ et une forêt à proximité immédiate du site, ainsi qu'en aval de la mine, dans une zone anciennement impactée par les effluents contaminés.
- un ancien site industriel situé à Auzon (Haute-Loire), où deux sols avec des teneurs contrastées en As ont été échantillonnés.

Les teneurs en As total des sols ont été mesurées par fluorescence X à l'aide d'un spectromètre portatif Niton (Niton® 723S). Le carbone organique total a également été dosé sur les sols secs, tamisés. Les échantillons de sol ont été analysés en COT par digestion au persulfate de sodium à chaud et analysé par spectroscopie infrarouge. L'oxydation de l'AsIII a été suivie sur des conditions en triplicat, pendant 4 jours, à raison de deux prélèvements par jour.

Les cinétiques obtenues à 0,2 et 1 g.L⁻¹ extrait de levure sont assez similaires entre elles, excepté pour un sol (Champs) pour lequel la concentration la plus élevée en extrait de levure à savoir 1 g.L⁻¹ semble stimuler l'oxydation de l'AsIII. Les essais à 10 g.L⁻¹ d'extrait de levure sur le sol Auzon 1 ont montré un fort effet inhibiteur.

Le graphique de la figure 3 a été obtenu à partir des mesures de concentrations en AsV après 67 h d'incubation. Les sols utilisés comme *inocula* sont classés sur l'axe des abscisses en fonction de leur concentration en arsenic *in situ*. A t = 67 h, l'oxydation de l'AsIII était terminée pour tous les échantillons exceptés pour les essais avec les sols de champs et de prairie, pour lesquels 90 h d'incubation ont été nécessaires. Ces sols étaient les deux sols les plus faiblement contaminés en As *in situ*.

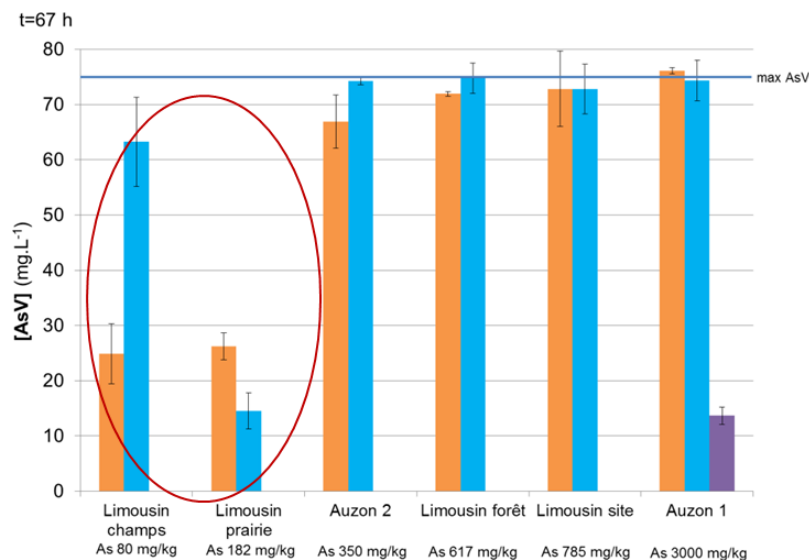


Figure 3. Concentrations en AsV mesurées dans les essais avec les sols à t = 67 h

Ces essais ont donc permis de mettre en évidence une relation entre la contamination *in situ* en As et le comportement de la communauté microbienne d'oxydation de l'arsénite. Il est possible que, dans les sols contenant de plus grandes concentrations en As, les communautés microbiennes soient en effet plus tolérantes à la présence d'AsIII, et plus

efficaces pour son oxydation. Il a pu également y avoir, dans ces sols, une « sélection » de bactéries utilisant l'oxydation de l'AsIII comme source d'énergie (« type *Thiomonas delicata* »). Dans les sols peu ou pas contaminés en As, la communauté bactérienne pourrait avoir un comportement d'oxydation de l'AsIII proche de celui observé avec la souche hétérotrophe (*H. arsenicoxydans*).

La figure 4 représente le rapport des constantes de vitesse d'oxydation calculées à partir des cinétiques obtenues à 0,2 et 1 g.L⁻¹ d'extrait de levure.

L'axe des abscisses représente les teneurs en carbone organique initial dans les sols. L'axe des ordonnées représente le rapport des constantes de vitesse d'oxydation de l'AsIII calculées pour 0,2 g.L⁻¹ et pour 1 g.L⁻¹ d'extrait de levure. Ainsi, si un point correspondant aux caractéristiques d'un sol se situe au-dessous de 1, cela signifie que l'oxydation a été plus rapide avec 1 g.L⁻¹ d'extrait de levure qu'avec 0,2 g.L⁻¹ d'extrait de levure. A l'opposé, si le point se trouve au-dessus de la ligne à 1, c'est que l'oxydation a été plus rapide à 0,2 g.L⁻¹ d'extrait de levure.

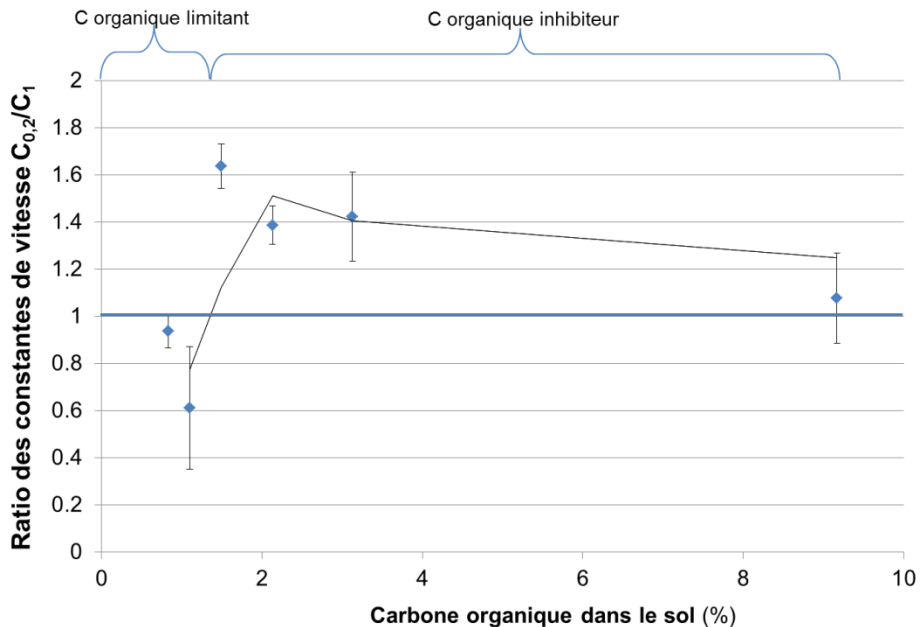


Figure 4. Influence de la teneur endogène en carbone organique des sols sur les vitesses d'oxydation de l'AsIII à 0,2 et 1 g.L⁻¹

Cette courbe met en évidence l'effet d'une augmentation de la concentration en extrait de levure sur l'oxydation de l'AsIII par les communautés microbiennes des différents sols. Ainsi dans les sols contenant une faible teneur en carbone organique (< 1,4 %), l'oxydation se trouverait stimulée par un amendement en extrait de levure, alors que dans les sols avec une haute teneur en carbone organique (> 1,4 %), un ajout d'extrait de levure à une concentration de 1 g.L⁻¹ semble ralentir voire inhiber l'oxydation de l'arsénite.

Il est possible que l'ajout de substrat organique à la matière organique déjà présente dans le sol ait eu pour effet d'atteindre un seuil inhibiteur pour les sols les plus riches. Il est également probable que les structures des communautés microbiennes étaient d'ores et déjà différentes entre les différents sols, dues aux teneurs originales en matière organique.

PERSPECTIVES

Les perspectives directes de ce travail sont (1) de compléter ces expériences avec des échantillons de sols provenant d'autres sites afin de vérifier la pertinence de nos hypothèses par des analyses statistiques et (2) de reproduire ces expérimentations en amendant les sols avec une mixture de substrats organiques complexe représentative de la matière organique des sols (sucres, acides aminés, acides carboxyliques communément retrouvés dans les sols). Les hypothèses relatives aux activités bactériennes vis-à-vis de l'arsenic seront vérifiées par la quantification des ARNm des gènes *aioA* et *ars*. Les conditions qui auront mis en évidence un effet du substrat organique sur l'oxydation bactérienne de l'arsénite seront ensuite appliquées dans des microcosmes de sols.

REFERENCES

- [1] Smedley P. L., Kinniburgh D.G., *A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters*. Appl Geochem 17 (2002), 517-568.
- [2] Wang S., Mulligan C. N., *Effect of natural organic matter on arsenic release from soils and sediments into groundwater*. Environ Geochem Hlth 28 (2006), 197-214.
- [3] Sposito G., *The surface chemistry of soils*. Oxford University Press, UK. (1984)
- [4] Saada A., Breeze D., Crouzet C., Cornu S., Baranger P., *Adsorption of arsenic(V) on kaolinite and on kaolinite-humic acid complexes. Role of humic acid nitrogen groups*. Chemosphere 51 (2003), 757-763.
- [5] Redman A. D., Macalady D. L., Ahmann D., *Natural organic matter affects arsenic speciation and sorption onto hematite*. Environ Sci Technol 36 (2002), 2889-96.
- [6] Bauer M., Blodau C., *Mobilization of arsenic by dissolved organic matter from iron oxides, soils and sediments*. Sci Tot Environ 354 (2005), 179-190.
- [7] Hoefl S. E., Kulp T. R., Stolz J. F., Hollibaugh J. T., OremLand R. S., *Dissimilatory arsenate reduction with sulfide as electron donor: experiments with mono lake water and Isolation of strain MLMS-1, a chemoautotrophic arsenate respire*. Appl Environ Microbiol 70 (2004), 2741-2147.
- [8] Battaglia-Brunet F., Jouliau C., Garrido F., Dictor M. C., Morin D., Coupland K., Johnson D.B., Hallberg K.B., Baranger P., *Oxidation of arsenite by Thiomonas strains and characterization of Thiomonas arsenivorans sp. nov.* A van Leeuw J Microb 89 (2006), 99-108.
- [9] Duquesne K., Lieutaud A., Ratouchniak J., Muller D., Lett M. C., Bonnefoy V., *Arsenite oxidation by a chemoautotrophic moderately acidophilic Thiomonas sp. : from the strain isolation to the gene study*. Environ Microbiol 10 (2008), 228-37.
- [10] Quéménéur M., *Les processus biogéochimiques impliqués dans la mobilité de l'arsenic : recherche de bioindicateurs*. Thèse de doctorat d'université. Laboratoire des Interactions Microorganismes-Minéraux-Matière Organique dans les Sols (LIMOS), UMR 7137 CNRS, Université Henri Poincaré de Nancy (2008).
- [11] Quéménéur M., Cébron A., Billard P., Battaglia-Brunet F., Garrido F., Leyval C., Jouliau C., *Population structure and abundance of arsenite-oxidizing bacteria along an arsenic pollution gradient in waters of the upper isle River Basin, France*. Appl Environ Microbiol 76 (2010), 4566-70.
- [12] Campos V. L., Valenzuela C., Yarza P., Kämpfer P., Vidal R., Zaror C., Mondaca M. A., Lopez-Lopez A., Rosselló-Móra R., *Pseudomonas arsenicoxydans sp nov., an arsenite-oxidizing strain isolated from the Atacama desert*. Syst Appl Microbiol 33(4), 193-197. Group, London, pp. 223-225 (2010).
- [13] Green H. H., *Isolation and description of a bacterium causing oxidation of arsenite to arsenate in cattledipping baths*. Rep Dir Vet Res Union of South Africa. 6 (1918), 593-599.
- [14] Weeger W., Lièvreumont D., Perret M., Lagarde F., Hubert J. C., Leroy M. and Lett M.C., *Oxidation of arsenite to arsenate by a bacterium isolated from an aquatic environment*. Biometals 12 (1999), 141-149.
- [15] Battaglia-Brunet F., Jouliau C., Breeze D., Poirier L., Coulon S., Guérin V., *Monitoring of arsenic bio-oxidation and bio-reduction activities in highly As-polluted soils during a phytostabilization field experiment (Phytoperf project)*. Consoil 2010, 11th International UFZ- Deltares/TNO Conference on Management of Soil, Groundwater and Sediment, Salzburg. (2010)
- [16] Challan-Belval S., Garnier F., Michel C., Chautard S., Breeze D., Garrido F., *Enhancing pozzolana colonization by AsIII-oxidizing bacteria for bioremediation purposes*. Env Biotechnol 84 (2009), 565-573.
- [17] Fuller C. C., Davis J. A., Waychunas G. A., *Surface chemistry of ferrihydrite-part2, kinetics of arsenate adsorption and coprecipitation*. Geochim Cosmochim Acta 57 (1993), 2271-2282.
- [18] Huang H., Jia Y., Sun G. X., Zhu Y.G., *Arsenic speciation and volatilization from flooded paddy soils amended with different organic matters*. Environ Sci Technol 46 (2012), 2163-2168.