Pertinence d'indicateurs biochimiques de l'impact du Cr sur le vivant en polyculture irriguée en zone périurbaine (Maroc)

Francoise Elsass, Nathalie Cheviron, J.-C. Thoisy-Dur, Virginie Grondin, Christelle Marrauld, Sébastien Breuil, Christian Mougin, Aziza Kouchou, Naoual Raïs, Naima El Ghachtouli, et al.

▶ **To cite this version:**

Francoise Elsass, Nathalie Cheviron, J.-C. Thoisy-Dur, Virginie Grondin, Christelle Marrauld, et al.. Pertinence d'indicateurs biochimiques de l'impact du Cr sur le vivant en polyculture irriguée en zone périurbaine (Maroc). 3èmes Rencontres nationales de la Recherche sur les sites et sols pollués, Nov 2014, Paris, France. hal-01628849

HAL Id: hal-01628849
https://hal.science/hal-01628849

Submitted on 5 Jun 2020

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.

Distributed under a Creative Commons Attribution - ShareAlike 4.0 International License

SSP ADEME 2014 Poster

Pertinence d'indicateurs biochimiques de l'impact du Cr sur le vivant en polyculture irriguée en zone périurbaine.

Françoise ELSASS[1*], Nathalie CHEVIRON[1], Jeanne-Chantal THOISY-DUR[1], Virginie GRONDIN[1], Christelle MARRAULD[1], Sébastien BREUIL[1], Christian MOUGIN[1], Aziza KOUCHOU[2], Naoual RAIS[2], Naïma EL GHACHTOULI[2], Mustapha IJJAALI[2], Joelle Duplay[3], Malika GHAZI[3]

[1] : UR 0251 PESSAC, INRA, RD10 78026 Versailles, France, francoise.elsass@versailles.inra.fr
[2] : FST, USMBA, Route d'Imouzzer, BP 2202, 30000 Fès, Maroc, naoualrais@yahoo.fr
[3] : UMR 7517 LHyGeS, CNRS/UdS, 1 rue Blessig 67084 Strasbourg, France, jduplay@unistra.fr

*Contact : Françoise ELSASS francoise.elsass@versailles.inra.fr

Résumé
Les eaux de surface utilisées pour l'irrigation de sols de la plaine fertile du Saiss (Maroc) sont affectées par une pollution significative en éléments traces métalliques (ETM), principalement en chrome. Une étude physico-chimique et biologique a été menée afin d'évaluer l'impact de cette contamination en chrome sur les fonctionnalités biogéochimiques des sols irrigués par les eaux de l'Oued Fès et l'Oued Sebou. Les analyses biochimiques (7 activités enzymatiques : laccase, arylsulfatase, β-glucosidase, β-galactosidase, phosphatase, arylamidase et uréase) de 6 sites d'étude ont permis d'établir des corrélations et des anti-corrélations entre différents paramètres mesurés et de mettre en évidence la particularité biochimique des sites étudiés. Les analyses des ETM devraient permettre d'étudier l'existence d'éventuelles corrélations entre la particularité biochimique de ces sites et leur contamination par les ETM, particulièrement le chrome VI. La perspective est de sélectionner des activités enzymatiques comme bioindicateur pertinent de la qualité des sols et pour améliorer les diagnostics de sols, notamment dans le cas des sites pollués.

Introduction
Au Maroc, le plan Maroc Vert place l'irrigation comme pivot principal dans le développement agricole et socio-économique du pays. De ce fait, dans la région Fès-Meknès, la plaine de Saiss riche en ressources en eaux et en sols fertiles est amenée à connaître une grande extension de terres irriguées. Cependant, l'environnement général de la plaine est affecté d'une façon alarmante par la croissance démographique et industrielle de la ville de Fès qui engendre une pollution organique et inorganique des eaux de surface de la plaine de Saiss utilisables pour l'irrigation (Oued Fès et Oued Sebou). En effet, des teneurs élevées en ETM et principalement en chrome ont été mesurées dans ces eaux de surface [1,2]. Par conséquent, l'utilisation de ces eaux pour l'irrigation constitue une source de contamination des sols irrigués situés sur les deux rives des deux oueds [3]. De nombreuses études ont montré que les métaux lourds avaient un impact négatif sur les activités enzymatiques des sols. Ce sont des indicateurs qui sont considérés comme sensibles aux polluants, et qui ont déjà été proposés comme des indicateurs de qualité de fonctionnement des sols [4]. Les quelques études spécifiques sur l'impact du chrome, portent essentiellement sur des oxydoréductases [5,6] et la phosphatase [7]. Elles ont mis en évidence une modification significative des activités.
Afin d'évaluer l'impact de cette contamination sur les fonctionnalités biogéochimiques des sols, des échantillons de sols prélevés sur les rives des deux oueds ont fait l'objet d'une étude physico-chimique et biologique. Nous avons choisi d'explorer la réponse des enzymes liées aux quatre cycles biogéochimiques (arylsulfatase, β-glucosidase, β-galactosidase, phosphatase, arylamidase et uréase) et d'une oxydoréductase connue pour sa sensibilité aux métaux lourds, la laccase.

Matériel et méthodes
Six sites ont été sélectionnés en fonction d'un gradient de contamination en ETM. Ils sont localisés sur des terres agricoles irriguées par les eaux de l'Oued Fès (S8) et de l'Oued Sebou en amont (S3) et en aval (S5 et S6), et au niveau de leur point de confluence (S4). Un site non irrigué (S0) sur la rive de l'Oued Sebou très en amont de la confluence est pris comme témoin (Figure1).
Pour chaque site, 5 prélèvements de terre ont été faits entre 0 et 10 cm. Trois aliquotes par échantillon ont été analysés à l'INRA PESSAC, France. Sept activités enzymatiques, le taux d'humidité, le carbone organique dissous (COD) et l'aromaticité ont été mesurés.

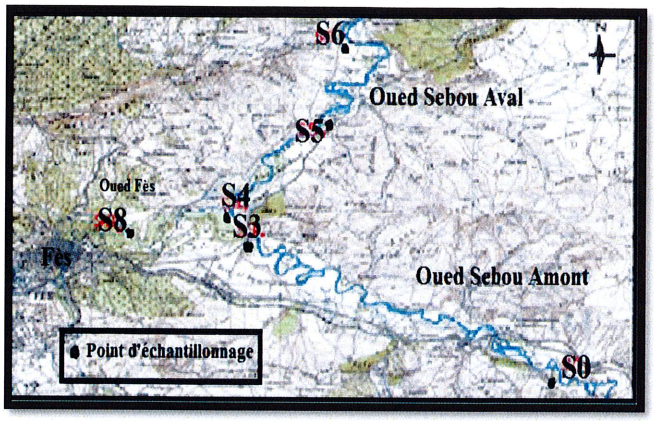


Figure 1 : Localisation des sites d'échantillonnage

Les activités Arylsulfatase (AryS), β-Galactosidase (βGAL), Phosphatase (PHOS) et Uréase (URE) sont mesurées suivant le protocole de [8]. L'Arylamidase (AryN) et la β-Glucosidase (bGLU) et la laccase (LACA) sont mesurées selon des protocoles modifiés de [9,10,11].
Une démarche d'analyse statistique des données après mesures sur 210 prélèvements de terre a été mise en œuvre. La détermination des coefficients de variation (CV%) de chaque activité enzymatique a permis de fixer une valeur totalement acceptable de la variabilité des mesures biologiques *in situ*. Ceci étant acquis, le tracé des réponses des activités enzymatiques pour chaque site par des figures de type boxplot (sous R) permet une description des valeurs centrales et de la variabilité des prélèvements. Les réponses des activités enzymatiques étant très différentes selon les sites, une comparaison des moyennes par tests non paramétriques (sous R) suivie d'un scoring du résultat du test a été menée. Cet outil permet un début d'interprétation des réponses biologiques, afin de proposer des hypothèses sur l'impact des contaminants et des pratiques agricoles telles que l'irrigation sur le fonctionnement biologique du sol.

Résultats et discussion

Les principaux résultats des caractérisations physique, physico-chimique, géochimique et microbiologique des terres agricoles de la région de Fès montrent que les sols échantillonnés présentent des caractéristiques pédotexturales et minéralogiques comparables (sols peu évolués d'apport alluvial, limoneux calcaires). Leur étude géochimique corrobore le fait que les échantillons les plus proches de la source de pollution (Oued Fès, en aval des rejets de tannerie) montrent des teneurs en ETM, comme le Cr mais aussi Ni-Cu-Zn-Pb, anormalement élevées.
La caractérisation microbiologique est basée sur le dénombrement de la microflore totale : des actinomycètes, des champignons et des bactéries résistantes au Cr(VI). Elle a montré que la pollution a affecté la taille et la biodiversité des populations de ces microorganismes.
Si nous prenons en compte l'ensemble des mesures d'activités enzymatiques, cela nous permet de différencier la localisation des prélèvements en fonction de leur position par rapport au point de rejet des contaminants : le site S8 proche du point de rejet d'une tannerie, S0-S3 en amont de la confluence, le site S4 à la confluence, les sites S5-S6 après la confluence.

Tableau 1. Matrice de corrélation des variables biochimiques analysés dans les sols.

Variables	LACA	AryN	βGAL	bGLU	PHOS	AryS	URE	THUM	AROM	COD
LACA	1	0.341	**0.717**	**0.705**	**0.676**	**0.748**	0.353	0.193	-0.336	**0.810**
AryN	0.341	1	**0.417**	**0.500**	**0.507**	**0.537**	0.138	**-0.414**	**0.438**	**0.404**
βGAL	**0.717**	**0.417**	1	**0.970**	**0.773**	**0.794**	**0.579**	-0.237	-0.193	**0.622**
bGLU	**0.705**	**0.500**	**0.970**	1	**0.774**	**0.783**	**0.502**	-0.276	-0.077	**0.596**
PHOS	**0.676**	**0.507**	**0.773**	**0.774**	1	**0.954**	**0.577**	-0.341	-0.135	**0.800**
AryS	**0.748**	**0.537**	**0.794**	**0.783**	**0.954**	1	**0.615**	-0.239	-0.147	**0.833**
URE	0.353	0.138	**0.579**	**0.502**	**0.577**	**0.615**	1	**-0.462**	-0.231	0.341
THUM	0.193	**-0.414**	-0.237	-0.276	-0.341	-0.239	**-0.462**	1	-0.270	0.122
AROM	-0.336	**0.438**	-0.193	-0.077	-0.135	-0.147	-0.231	-0.270	1	**-0.409**
COD	**0.810**	**0.404**	**0.622**	**0.596**	**0.800**	**0.833**	0.341	0.122	**-0.409**	1

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification alpha=0.05

La matrice de corrélation des variables analysés (activités enzymatiques, taux d'humidité THUM, carbone organique dissous COD, aromaticité AROM) au niveau des sols échantillonnés nous permet de décrire différents niveaux de corrélations et des anti-corrélations (Tableau 1).
- Les corrélations fortes supérieures à 0.8 : βGAL/GLU, COD/LACA, COD/PHOS et COD/AryS.
- Les bonnes corrélations entre 0.6 et 0.8 : LACA/βGAL, LACA/bGLU, LACA/PHOS, LACA/AryS, βGAL/PHOS, βGAL/AryS, bGLU/PHOS et bGLU/AryS.
- Les corrélations moyennes sont comprises entre 0.4 et 0.6 : AryN/βGAL, AryN/bGLU, AryN/PHOS, AryN/AryS, URE/βGAL, URE/bGLU, URE/PHOS, URE/AryS, AROM/AryN, COD/AryS, COD/βGAL et COD/bGLU.
- Les anti-corrélations généralement modérées entre -0.4 et -0.5 : THUM/AryN, THUM/URE et COD/AROM.

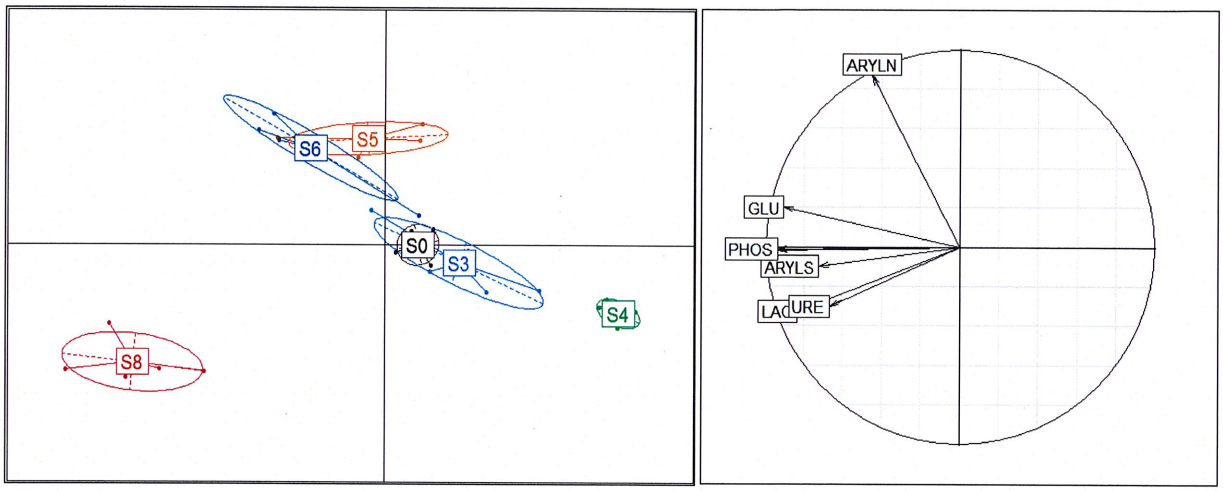


Figure 2 : Cercle des corrélations et représentation graphique des individus sur les axes 1 et 2 de l'analyse en composantes principales des mesures d'activités enzymatiques

L'analyse en composantes principales réalisée à partir des différentes activités enzymatiques (Figure 2) permet de distinguer et de caractériser 3 groupes.
Le premier groupe est constitué des prélèvements du site S8 le plus fortement contaminé qui se trouve en aval de rejets de tanneries dans l'Oued Fès ; ce site est caractérisé par des valeurs les plus élevés en activités enzymatiques (LACA, βGAL, bGLU, URE, AryS, PHOS) et le COD.
Le second groupe est constitué des prélèvements du site S4 qui représente le point de la confluence entre les deux oueds ; ce site est caractérisé par un taux d'humidité plus élevé et des activités enzymatiques plus faibles par rapport à tous les autres sites.
Le troisième groupe est constitué des sites S0 (non irrigué), S3 (Amont Oued Sebou), S5 (Aval Oued Sebou 4 km après la confluence), et S6 (Aval Oued Sebou 10 km après la confluence) ; ce groupe est caractérisé par une activité AryN plus importante et une aromaticité plus élevée.

Conclusions et perspectives

Cette étude a permis de distinguer des corrélations et des anti-corrélations entre les paramètres mesurés, et de définir trois groupes avec une particularité biochimique bien définie au niveau de chaque groupe. Une analyse en tenant compte des contaminants, de leur biodisponibilité, des itinéraires de culture, des données pédologiques permettra certainement de comprendre les variations globales et plus spécifiques pour l'interprétation des modifications observées pour l'ensemble des activités enzymatiques.
Les résultats de ce travail seront exploités dans le cadre d'une analyse du cycle de vie, pour évaluer les impacts sur les sols liés aux activités industrielles et agricoles de la région de Fès. Il s'agira d'analyser la contribution des émissions locales en ETM à l'écotoxicité terrestre, avec des facteurs de caractérisation spécifiques. Concernant Cr plus particulièrement, il sera pertinent de prendre en compte le potentiel des microorganismes à modifier sa spéciation (CrVI en CrIII) et à diminuer ainsi sa toxicité [12]. Cet aspect important permettra une meilleure appréciation de la qualité biologique des sols agricoles et par conséquent du degré d'impact de l'irrigation sur les sols et la chaîne trophique.

Références

[1] Koukal, B., Dominique, J., Vignati D., Arpagaus, P., Santiago, S., Ouddane, B., Benaabidate, L. (2004). Assessment of water quality and toxicity of polluted rivers Fez and Sebou in the region of Fez (Morocco). *Environmental Pollution,* 131,163-172.
[2] Perrin, J.-L., Bellarbi, M., Lombard-Latune, R., Rais, N., Chahinian, N., Ijjaali, M. (2010). Spatial and temporal variation of the water quality of an intermittent river, Oued Fez (Morocco). In E. Servat, S. Demuth, A. Dezetter & T.

Daniell (Eds.). Global Change: Facing Risks and Threats to Water Resources. *Proceedings of the Sixth World FRIEND Conference, Fez, Morocco*, IAHS Publisher, pp. 390-397.
[3] Bellarbi, M., Rais, N., Mouaddine, A., Elsass, F., Duplay, J. (2011). Caractérisation physique et chimique des sols de Fès-Ouest. *21ème Colloque International des Bassins Sédimentaires, Fès, Maroc*. Affiche.
[4] Trasar-Cepeda, C. Leiros M.-C., Seoane, S., Gil-Sotres, F. (2000). Limitations of soil enzymes as indicators of soil pollution. *Soil Biology & Biochemistry*, 32, 1867-1875.
[5] Stepniewska, Z, Wolińska, A., Ziomek, J. (2009). Response of soil catalase activity to chromium contamination. *Journal of Environmental Sciences*, 21, 1142-1147.
[6] Polti, M.-A., Amoroso, M.-J., Abate, C.-M. (2010). Chromate reductase activity in *Streptomyces* sp. MC1. *The Journal of General and Applied Microbiology*, 56, 11-18.
[7] Raman, N., Srinivasan, V., Ravi, M. (2002). Effect of Chromium on the Axenic Growth and Phosphatase Activity of Ectomycorrhizal Fungi, *Lacaarria laccata* ans *Suillus bovinus*. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 68, 569-575.
[8] de Santiago-Martin, A., Cheviron, N., Quintana, J.-R, Gonzalez, C, Lafuente, A.-L, Mougin, C. (2013). Metal Contamination Disturbs Biochemical and Microbial Properties of Calcareous Agricultural Soils of the Mediterranean Area. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 64, 388-398.
[9] Eivazi, F., Tabatabai, M.-A., (1990). Factors affecting glucosidase and galactosidase activities in soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 39, 891-897.
[10] Tabatabai, M.-A, Garcia-Manzanedo, A.-M, Acosta-Martinez, V. (2002). Substrate specificity of arylamidase in soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 34, 103-110.
[11] Anastasi, A., Coppola, T., Prigione V., Varese, G.-C. (2009). Pyrene degradation and detoxification in soil by a consortium of basidiomycetes isolated from compost: Role of laccases and peroxidases. *Journal of Hazardous Materials*, 165, 1229–1233
[12] Desjardin, V., Bayard, R., Huck, N., Manceau, A., Gourdon, R. (2002). Effect of microbial activity on the mobility of chromium in soils. *Waste Management*, 22, 195-200.

Remerciements
Travaux soutenus par le Ministère des Affaires étrangères : Programme de Recherches en Agronomie pour le Développement (PRAD).

Pertinence d'indicateurs biochimiques de l'impact du Cr sur le vivant en polyculture irriguée en zone périurbaine (Maroc)

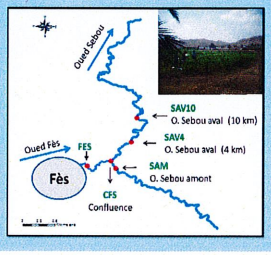
Françoise ELSASS [1], Nathalie CHEVIRON [1,2], Jeanne Chantal THOISY-DUR [1],
Virginie GRONDIN [1,2], Christelle MARRAULD [1,2], Sébastien BREUIL [1]
Aziza KOUCHOU [3], Naoual RAIS [3], Naima EL GHACHTOULI [3], Mustapha IJJAALI [3],
Malika GHAZI [4], Joëlle DUPLAY [4]

1- Problématique

Le « Plan Maroc Vert » place l'irrigation comme pivot principal dans le développement agricole et socio-économique du pays. Dans la région Fès-Meknès, la plaine de Saiss, riche en ressources en eaux et en sols fertiles est amenée à connaître une grande extension de terres irriguées. Cependant, l'environnement général de la plaine est affecté d'une façon alarmante par la croissance démographique et industrielle de la ville de Fès qui engendre une pollution organique et inorganique des eaux de surface utilisables pour l'irrigation (Oued Fès et Oued Sebou).
Certaines activités enzymatiques des sols, dont les activités hydrolases, sont considérées comme sensibles aux polluants et ont déjà été proposées comme des indicateurs de qualité de fonctionnement des sols. Cette étude porte essentiellement sur l'impact du cortège de métaux de transition et du chrome sur l'augmentation / atténuation de six activités hydrolases.

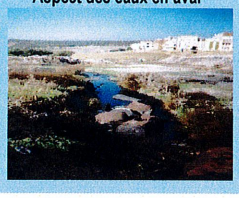
2- Zone d'étude

La zone d'étude présente un climat semi-aride méditerranéen à saisons contrastées.
Les cultures sont irriguées en période sèche par les eaux de l'oued.
Les 5 sites sélectionnés représentent les terrains irrigués par les deux oueds en amont (SAM sur O. Sebou FES sur O. Fès) et en aval (SAV sur O. Sebou) de leur point de confluence (CFS).
Les sols sont alcalins (pH = 8,3), carbonatés (carbonates 35 à 60%), riches en matière organique (4,7 à 5,2%), à faible conductivité électrique (80 à 150 µS/mm).
La texture est limoneuse (SAM, FES et CFS) à limono-argileuse (SAV).

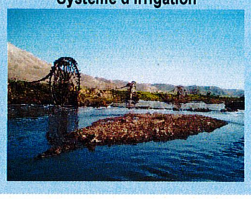


Effluents de tanneries

Aspect des eaux en aval



Système d'irrigation



3- Méthodologie

Caractéristiques du sol : Les sols sont prélevés dans la couche 0-10 cm en 5 points d'un carré centré de 5 m de côté.

La terre fine est analysée pour les caractéristiques suivantes : texture par granulométrie laser, calcimétrie (NF ISO 10693) ; pH eau (NF ISO 10390) ; matière organique par pyrolyse (NF ISO 14235) ; conductivité électrique (NF ISO 11265) ; minéralisation (méthode BCR) ; analyses chimiques des éléments totaux et traces (Cr, Cu, Ni et Zn) par spectroscopie d'absorption atomique (ICP-AES).

Indicateurs biochimiques : Les sols sont tamisés à 5 mm. Trois aliquotes de 4 g par prélèvement de sol servent pour le dosage de six activités enzymatiques des 4 cycles biochimiques P, S, N et C.

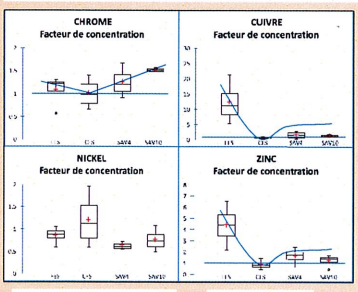
Les activités Phosphatase, Arylsulfatase, β-Galactosidase, Uréase , Arylamidase et β-Glucosidase, sont mesurées avec une modification des protocoles respectifs de : de Santiago-Martin *et al.* (2013), Eivazi & Tabatabai (1990), Tabatabai *et al.* (2002), Anastasi *et al.* (2009).

4- Résultats

TRAITEMENT DES DONNEES : Le niveau de pollution en ETM est évalué par différents facteurs :
CF (Facteur de Contamination) = C (Elément métallique) / C (Elément métallique dans un sol non pollué) ;
PLI (Pollution Load Index) = (CF_Cr x CF_Ni x CF_Cu x CF_Zn) $^{1/4}$;
PLI > 1 indique la présence de contamination ; PLI < 1 indique un appauvrissement.
Dans cette étude on se réfère à un niveau local éloigné de la source de pollution (SAM témoin), appelé « référence géochimique » pour la région.

TRAITEMENT DES DONNEES : L'impact des métaux sur les activités enzymatiques est évalué par différents facteurs :
CI (Facteur d'intensité) = C (Activité enzymatique) / C (Activité enzymatique dans un sol non pollué) ;
EAI (Enzymatic Activity Index) = (CF_Phos x CF_Sulf CF_Urea x CF_Amid CF_Gluc x CF_Gala) $^{1/6}$;
EAI > 1 indique une augmentation de l'activité ; AEI < 1 indique une atténuation.
Dans cette étude on se réfère au niveau d'activité dosé dans le sol SAM témoin, servant de référence d'usage du sol dans la région considérée.

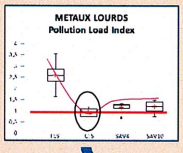
METAUX LOURDS : Facteurs de concentration / sol témoin



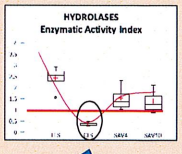
Tanneries, peintures et acier inox

Dinanderie du cuivre

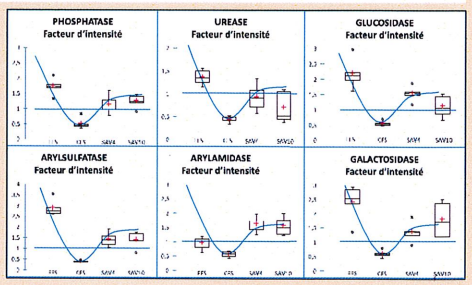
Indice PLI



Indice EAI



ACTIVITES BIOCHIMIQUES HYDROLASES : Facteurs d'intensité / sol témoin



Cycles de P et S | Cycle de N | Cycle du C

Les facteurs de concentration dans le sol « FES » reflètent l'origine d'une pollution par Cu et Zn. Les concentrations en Ni sont erratiques. La contamination par Cr augmente légèrement en aval de la confluence

Les profils d'activités des cycles de P, S, N et C sont comparables. Les profils des facteurs d'intensité des cycles de P, S et C sont identiques. Les activités Phosphatase et Galactosidase apparaissent comme les meilleurs indicateurs de la présence de métaux de transition dans nos sols. Les fortes atténuations des activités hydrolases à la confluence « CFS » ne s'expliquent pas par la présence des métaux pris en compte.

5- Conclusions et perspectives

Les profils des Indices de Charge de Pollution (PLI) et des Indices d'Activités Enzymatiques (EAI), basés sur le même principe de calcul, apparaissent décrire fidèlement les variations biogéochimiques des sols étudiés.

Concernant Cr plus particulièrement, il sera pertinent de prendre en compte le potentiel des microorganismes à modifier sa spéciation (CrVI en CrIII) et à diminuer ainsi sa toxicité. Des expérimentions de contamination par CrVI en microcosmes sont actuellement en cours.

Les résultats de ce travail seront exploités dans le cadre d'une Analyse du Cycle de Vie, pour évaluer les impacts sur les sols liés aux activités industrielles et agricoles de la région de Fès. Il s'agira d'analyser la contribution des émissions locales en ETM à l'écotoxicité terrestre, avec des facteurs de caractérisation basés sur des facteurs de devenir et d'effet spécifiques. Il est question dans un premier temps, d'étudier la mobilité des ETM dans les sols pour comprendre leur mobilité et calculer leurs fractions biodisponibles dans la solution du sol. Ensuite les facteurs d'effet des ETM seront calculés en prenant en compte, surtout pour le Cr, la modification de la spéciation et la diminution du potentiel toxique par les microorganismes.

Références

de Santiago-Martin, A., Cheviron, N., Quintana, J.-R, Gonzalez, C, Lafuente, A.-L, Mougin, C. (2013). Metal Contamination Disturbs Biochemical and Microbial Properties of Calcareous Agricultural Soils of the Mediterranean Area. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 64, 388-398.
Eivazi, F., Tabatabai, M.-A., (1990). Factors affecting glucosidase and galactosidase activities in soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 39, 891-897.
Tabatabai, M.-A, Garcia-Manzanedo, A.-M, Acosta-Martinez, V. (2002). Substrate specificity of arylamidase in soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 34, 103-110.
Anastasi, A., Coppola, T., Prigione V., Varese, G.-C. (2009). Pyrene degradation and detoxification in soil by a consortium of basidiomycetes isolated from compost: Role of laccases and peroxidases. *Journal of Hazardous Materials*, 165, 1229–1233.

Auteurs

[1] : UR 0251 PESSAC, INRA, RD10, 78026 Versailles, France, francoise.elsass@versailles.inra.fr
[2] : Biochem-Env, INRA Versailles, Rte de St Cyr, 78026 Versailles, www.biochemenv.fr
[3] : FST, USMBA, Route d'Imouzzer, BP 2202, 30000 Fès, Maroc, kouchouaziza@gmail.com
[4] : UMR 7517 LHyGeS, CNRS / UdS, 1 rue Blessig, 67084 Strasbourg, France, jduplav@unistra.fr

Remerciements

Travaux soutenus par le Ministère des Affaires Étrangères et de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche française et les Ministères marocains de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche Scientifique et de l'Agriculture et du Développement rural - (PHC PRAD-TOUBKAL).

3e Rencontres nationales de la Recherche sur les Sites & Sols Pollués, 18-19 novembre 2014, Paris