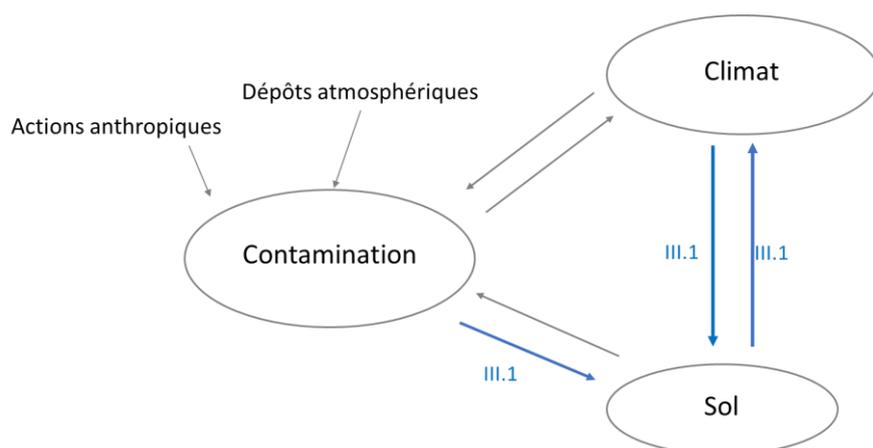


Importance de la prise en compte explicite de la contamination des sols dans les modèles mécanistiques de surface continentale

Les modèles de surface continentale sont largement utilisés à des fins prospectives afin d'estimer les effets de scénarii d'émissions de GES sur les cycles biogéochimiques ou sur le climat, tandis que la contamination des sols est dépendante localement de l'usage qui est fait des sols mais aussi des politiques de régulations d'apport mises en place. Dans cette partie III notre objectif était double : i) identifier si les effets d'une contamination *in situ* en Cu, constatée en partie II comme pouvant concerner de grandes surfaces mais non prise en compte dans ces modèles, est d'ampleur suffisante pour affecter significativement les prévisions de respiration hétérotrophe de ces modèles et ii) si pertinent, proposer des fonctions prenant en compte la contamination du Cu pour être incorporées dans ces modèles.

Cette partie est ainsi divisée en trois chapitres., Le chapitre III.1 cherchera à établir si les erreurs d'estimations de Rh des modèles de surface continentale s'expliquent par la non prise en compte de la contamination des sols au Cu dans ces modèles. Le chapitre III.2 visera à établir une fonction réponse générale entre contamination au Cu des sols et Rh. Le chapitre III.3 aura pour but de compléter le modèle de biogéochimie continentale DNDC par des fonctions prenant en compte l'effet du Cu sur le cycle de l'azote pour différentes conditions d'humidité du sol. Ce modèle (DNDC-Cu) sera ensuite utilisé pour prédire les émissions d'espèces azotées en fonction de la concentration en Cu et pour différentes conditions d'humidité du sol.

Le premier chapitre de cette partie III concerne les interactions entre la contamination et les sols (effet d'une contamination en Cu sur les fonctions du sol), entre le climat et le sol (effet des précipitations sur les émissions azotées) et entre les sols et le climat (modification des émissions de C et N dans les sols contaminés) schématisées ci-dessous



III.1. La contamination des sols, un facteur manquant dans la dynamique du carbone des sols des modèles de surface continentale. Cas d'étude du Cu

La contamination des sols est-elle un paramètre à prendre en compte pour l'estimation de la respiration hétérotrophe par les modèles de surface continentale ? Cas d'étude du Cu

En cours de soumission pour Global Change Biology

Résumé en français :

Les modèles de surface continentale sont des composantes importantes des modèles de système Terre utilisés pour estimer l'effet des émissions de gaz à effet de serre (GES) anthropiques sur le climat de la Terre. Cependant, en plus des changements d'utilisation des terres et des émissions directes de GES pris en compte dans ces modèles, les activités anthropiques sont également associées à l'émission et aux apports de contaminants. Or, malgré l'effet de la contamination sur les processus du sol (comme les émissions de GES), celle-ci n'est pas encore considérée comme un paramètre important à prendre en compte dans les modèles de surface continentale.

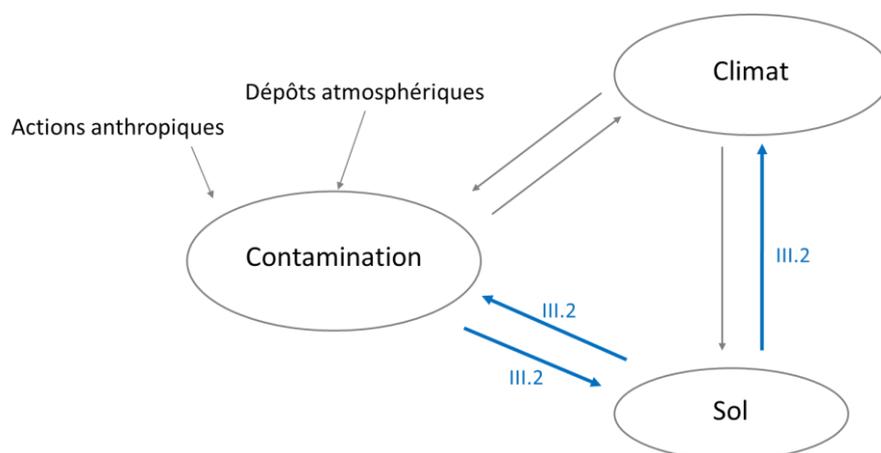
Ici, nous avons cherché à évaluer l'importance de la contamination du sol dans les émissions de CO₂ du sol sous la forme de la respiration hétérotrophe (Rh). Par conséquent, nous avons analysé, à l'échelle de l'Europe, si la contamination du sol peut expliquer les résidus de Rh modélisés à partir de 4 modèles de surface continentale par rapport aux produits de Rh dérivés d'observations. Nous avons utilisé un modèle mixte généralisé des moindres carrés (GLS) pour évaluer les principaux facteurs des résidus du modèle. Parmi les contaminants, nous nous sommes concentrés sur le Cu qui est largement utilisé dans l'industrie ou dans l'agriculture, provoquant une contamination diffuse sur de grandes surfaces. De plus, il a été montré que la Rh du sol et la disponibilité du Cu pour la faune du sol dépendaient fortement des paramètres pédologiques et climatiques du sol. Notre analyse a donc été complétée par l'inclusion des paramètres pédo-environnementaux et par l'analyse du Rh par rapport au Cu libre - un proxy du Cu biodisponible.

Nos résultats montrent que le Cu est un paramètre non négligeable pouvant expliquer les inexactitudes dans la modélisation des Rh, que ce soit en considérant le Cu total ou le Cu libre. L'effet partiel du Cu s'est avéré aussi fort que d'autres facteurs pédologiques tels que l'argile ou le pH et dans certains cas que la température pour expliquer les résidus des modèles. Lorsque le Cu (total ou libre) a été jugé significatif, la différence entre Rh modélisé et observé s'est avérée augmenter avec l'augmentation de la concentration de Cu dans le sol pour des concentrations en Cu modérées à élevées et diminuer pour les plus élevées. Le seuil de Cu auquel les tendances des différences entre le Rh modélisé et observé s'inverse s'est cependant avéré différent selon les modèles et les produits d'observation considérés.

Conclusion intermédiaire (4) :

Le chapitre III.1 est basé sur des estimations statistiques de la respiration des sols (Rh) et des concentrations en Cu. Cela a permis de mettre en évidence que la contamination au Cu en Europe, non prise en compte dans les modèles de surface continentale pouvait expliquer une partie significative de l'erreur de modélisation des flux de Rh de ces modèles. La prise en compte du Cu sous sa forme de Cu libre au chapitre III.1 n'a pas permis d'améliorer les capacités prédictives des modèles par rapport à la considération conjointe d'un effet du pH et d'un effet de la concentration en Cu. Les chapitres III.2 et III.3, basés sur des mesures de laboratoire où les concentrations en Cu et les valeurs de Rh ont été systématiquement mesurées visent à affiner la modélisation prédictive d'un effet du Cu sur Rh et sur les émissions d'espèces azotées des sols par la détermination d'équations.

Le chapitre III.2 concerne les interactions schématisées ci-dessous



III.2 La contamination en cuivre des sols affecte-t-elle leurs émissions de CO₂ ? Etude bibliographique

Accepté dans Frontiers

Résumé en français :

Les sols contaminés sont très répandus et l'on sait que la contamination a un impact sur plusieurs processus biotiques du sol. Cependant, on ne sait toujours pas dans quelle mesure la contamination du sol affecte l'efflux de carbone du sol (CO₂) dû à la respiration de la microfaune du sol. Du fait des grands stocks de carbone organique (Corga) stockés dans les sols, même des changements limités dans les flux sortants peuvent modifier substantiellement la concentration de CO₂ atmosphérique et avoir des rétroactions importantes sur le climat. Dans cette étude, nous avons cherché à évaluer et à quantifier l'impact d'une contamination du sol sur sa respiration. Pour cela, nous avons effectué une

revue quantitative de la littérature en nous concentrant sur i) les mesures de respiration hétérotrophe du sol, excluant ainsi la respiration autotrophe des plantes, ii) la contamination du sol par le cuivre, et iii) l'influence des paramètres pédo-climatiques tels que le pH, la teneur en argile ou le type de climat. Sur la base de 389 données ainsi récupérées, nous avons montré une diminution des émissions de CO₂ du sol avec une augmentation de la contamination en cuivre du sol. Les données spécifiques provenant d'expériences de contamination ex-situ ont pu être facilement différenciées de celles provenant de la contamination in-situ en raison de la diminution plus marquée de la minéralisation de Corga dans ces sols. Grâce aux données des contaminations ex-situ nous avons pu déterminer un seuil dans les teneurs en Cu du sol affectant les émissions de CO₂ : les émissions de CO₂ augmentent pour des apports inférieurs à 265 mgCu.kg⁻¹ de sol et diminuent au-dessus de cette concentration. Les données sur les contaminations in situ de long terme dues aux activités anthropogéniques (industrialisation, agriculture, ...) ont également montré un impact sur la minéralisation du carbone du sol, en particulier pour les contaminations industrielles (fonderie, boues d'épuration, ...) où les émissions de CO₂ diminuent lorsque la contamination en Cu augmente. Le pH du sol a été identifié comme étant un facteur significatif dans l'effet du Cu sur les émissions de CO₂. En effet, la minéralisation du carbone du sol s'est avérée plus sensible à la contamination par le Cu dans les sols acides que dans les sols neutres ou alcalins. Inversement, la teneur en argile et le type de climat n'expliquent pas de manière significative les effets du Cu sur la minéralisation du carbone dans le sol. Enfin, les données recueillies ont été utilisées pour proposer une équation empirique quantifiant l'effet d'une contamination au Cu sur la respiration du sol. La diminution des émissions de CO₂ du sol ne peut cependant pas se traduire comme un effet « puit de carbone » car elle s'accompagne d'une diminution de la biomasse microbienne du sol.

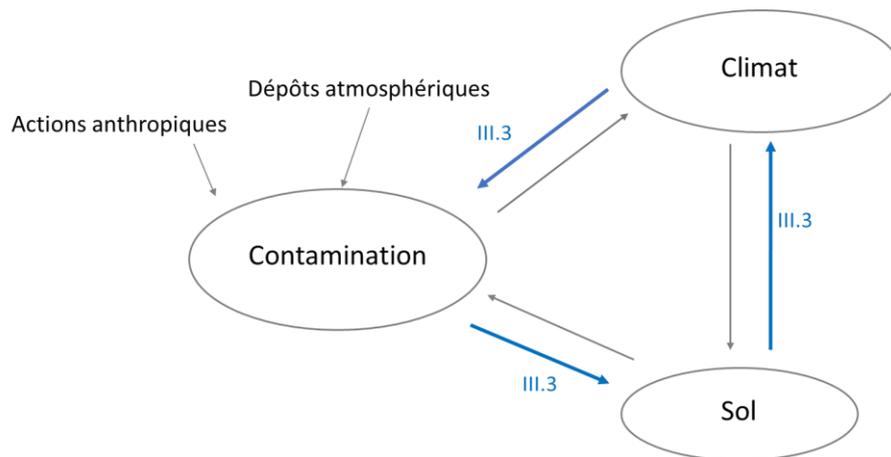
Conclusion intermédiaire (5) :

L'étude conduite au chapitre III.2 nous a permis d'établir une relation générique entre contamination des sols au Cu et respiration hétérotrophe à travers une grande variété de type de sols et de climats. Nous avons pu confirmer un effet de la concentration en Cu totale sur la respiration hétérotrophe, mais aussi la nécessité d'inclure le pH comme co-facteur. La gamme de concentration en Cu plus étendue que celle rencontrée *in-situ* et utilisée en III.1 a permis de montrer que les concentrations très élevées en Cu s'accompagnaient d'une diminution de la respiration hétérotrophe et de la biomasse microbienne.

La revue quantitative nous a permis de mettre en évidence un effet du climat du lieu de prélèvement dans les respirations hétérotrophes. Cet effet n'a cependant pu être inclus que sous un aspect qualitatif prenant en compte de grands types de régime hydriques. D'autre part, nous n'avons pu prendre en compte cet effet qu'en terme de modulation de l'ordonnée à l'origine, c'est-à-dire pour de faible niveau de (« sans ») Cu. Pour autant, les variations des communautés bactériennes avec le climat peuvent également induire des réponses différentes (c'est-à-dire différentes pentes dans notre III.2) au Cu.

En parallèle, outre les émissions de CO₂, les espèces azotées sont d'importants gaz à effet de serre, en termes de quantité comme de pouvoir de réchauffement. Les émissions d'N étant moins bien renseignées que celles de carbone, la définition de fonction réponse entre émissions d'espèces azotées et contamination au Cu ne peut se faire par revue quantitative. L'étude II.2. a permis de mettre en évidence l'effet du double stress environnemental (chimique et de contamination) sur les fonctions de nitrification mais pas d'estimer les retombées sur les émissions. L'objectif du III.3. a donc été de proposer un modèle prenant en compte les effets conjoints du Cu et de différents régimes hydriques sur les émissions d'espèces azotées des sols.

Le chapitre III.3 concerne les interactions schématisées ci-dessous :



III.3. Dans quelle mesure les stress d'humidité et de contamination des sols peuvent affecter leurs émissions de gaz à effet de serre ? Calibration d'un modèle de nitrification-dénitrification*.

Soumis à Biogeosciences

Résumé en français:

Les modèles biogéochimiques continentaux sont couramment utilisés pour investiguer l'effet de l'usage des terres, de l'apport de matière organique exogène ou du changement climatique sur les émissions de gaz à effet de serre des sols. Cependant, ils ne peuvent pas encore être utilisés pour étudier l'effet de la contamination du sol, alors même que l'on sait qu'elle affecte plusieurs processus des sols et concerne une grande partie de la surface terrestre. Nous avons implémenté un modèle couramment utilisé pour estimer les émissions d'azote (N) des sols, le modèle DeNitrification DeCompostion (DNDC), avec une fonction prenant en compte la contamination du sol par le cuivre (Cu) dans la modulation de la production de nitrate. Ensuite, nous avons utilisé ce modèle pour prédire les émissions de N-N₂O, N-NO₂, NO_x et N-NH₄ en présence de Cu et dans le contexte de changements des précipitations. Pour cela, des incubations de sols ont été réalisées à différentes humidités de sol afin de mimer les régimes pluviométriques attendus au cours des prochaines décennies et notamment la sécheresse et l'excès d'eau. L'effet de ce double stress sur la production de nitrate du sol a ensuite été étudié avec un bio-essai. Ensuite, les données de production de nitrate obtenues pour chaque traitement d'humidité ont été utilisées pour paramétrer le modèle DNDC et estimer les émissions de N du sol en considérant les différents effets du Cu. Quelle que soit l'humidité de la préincubation, les résultats expérimentaux ont montré une diminution de la production de N-NO₃ lors de l'ajout de Cu mais avec une nette différence selon l'humidité du sol. La version de DNDC-Cu que nous avons proposée a été capable de reproduire les effets observés du Cu sur la concentration en nitrate du sol avec $r^2 > 0.99$ et $RMSE < 10\%$ pour tous les traitements dans la gamme de calibration du DNDC-Cu (>40% de la capacité de rétention d'eau) mais a montré de mauvaises performances pour les sols secs. Nous avons modélisé un effet du Cu induisant une augmentation de la concentration et des émissions de N-NH₄ dans le sol en raison d'une activité de nitrification réduite, et donc une diminution des concentrations et des émissions de N-NO₃, N-N₂O et N-NO_x. L'effet de l'ajout de Cu était plus important sur les émissions de N-N₂ et N-N₂O que sur les autres espèces d'azote et plus important pour les sols incubés sous humidité constante que variable.

* Les expériences exploitées dans ce chapitre ont été réalisées dans le cadre du stage de M2 de Charlotte Blasi en 2015-2016 : Blasi C. 2017. Impact of climate change on threshold in terrestrial ecotoxicology. Internship report M2 Master Sciences, Technologies, santé, mention STEE et Chimie, spécialité EXCE (Ecotoxicologie et Chimie de l'Environnement), Université Bordeaux, 38pp + Annexes. Encadrement I. Lamy et B. Guenet

Conclusion intermédiaire (6) :

Au cours du chapitre III nous avons pu mettre en évidence que la contamination au Cu, à des niveaux environnementaux de contamination diffuse comme à des concentrations très supérieures de laboratoire, affectait la respiration hétérotrophe du sol. Le chapitre III.1 a permis de mettre en évidence que les surfaces et concentrations concernées par une contamination en Cu affectaient significativement les capacités prédictives de respiration hétérotrophe des modèles de surface continentale. Les études à grande échelle conduites sur les effets de la concentration en Cu des sols et leur respiration hétérotrophe (III.1 et III.2) n'ont pas mis en évidence de palier dans les effets du Cu, mais plutôt une réponse bi-type où les émissions de CO₂ augmentent à de faibles concentrations en Cu et diminuent à de plus fortes concentrations. Le chapitre III.2 a permis de déterminer une équation générique pour prédire les effets d'une contamination au Cu sur les émissions de CO₂ du sol émanant de Rh. Les expériences conduites dans le chapitre III.3 ont permis de prendre en compte les effets d'une contamination au Cu sur les émissions d'azote ainsi que les effets du double stress de contamination et de modification des précipitations dans le modèle DNDC-Cu. Nos résultats montrent que les émissions azotées diminuent quand la concentration en Cu augmente et que cette diminution est plus faible pour des sols soumis à des changements d'humidité du sol (assèchement dessèchement) que pour des sols soumis à des humidités constantes.