

## A la recherche de boucles de rétroaction dans la zone critique

### Stage niveau Master 2

De nombreux exemples dans la nature et les sociétés montrent que des perturbations lentes et graduelles des « forçages » (ex. les pluies) peuvent induire des changements abrupts dans le système auxquels elles s'appliquent (ex. un bassin versant, ..), qui peuvent perdurer même lorsque la perturbation initiale cesse (bascullements).

A l'échelle planétaire, le possible basculement d'éléments clés du système terre sous l'effet du changement climatique est une préoccupation actuelle de la communauté scientifique (McKay, 2022<sup>1</sup>). Une étude sur un éco-hydrosystème semi-aride africain, menée par l'équipe qui propose ce travail, montre que le déclin observé de la végétation est lié à un phénomène de bascule vers un état dégradé déclenché par un épisode de sécheresse (Wendling et al, 2019<sup>2</sup>).

Ce type de comportement est généralement dû à l'existence boucle(s) de rétroaction positive(s) dans la dynamique interne du système. C'est une propriété fréquente des systèmes complexes. Une boucle de rétroaction désigne le processus par lequel une cause génère un effet sur un élément d'un système, qui agit en retour sur cette cause. Une rétroaction positive amplifie la cause initiale (ex la fonte du permafrost causée par le réchauffement climatique amplifie ce réchauffement par des émissions induites de méthane), alors qu'une rétroaction négative joue un rôle de stabilisation (ex un thermostat régule le chauffage pour maintenir la température autour de la température visée).

La zone critique (ZC) désigne l'espace entre la roche mère non altérée, en bas, et le sommet des couverts arborés (la canopée), en haut. C'est un système complexe, composé de nombreux sous-systèmes en interaction sur une large gamme d'échelles d'espace et de temps. Cette zone est qualifiée de critique car c'est le support de la vie terrestre continentale, qui pourvoit aux humains, notamment, une partie des ressources dont ils ont besoin (eau, sols, végétaux et animaux...). Dans le contexte des changements globaux, comprendre la réponse de la ZC aux perturbations permet d'anticiper ses trajectoires d'évolution et de déterminer comment éviter ou atténuer des changements indésirables et / ou s'y adapter s'ils adviennent.

L'infrastructure de recherche OZCAR (Observatoires de la Zone Critique : Applications et Recherche, <https://www.ozcar-ri.org>) fédère les observatoires de la zone critiques français. Un travail préliminaire d'identification et de description de quelques boucles de rétroaction dans la ZC a été réalisé à partir de l'expertise des scientifiques de ces observatoires (voir exemple en annexe).

L'objectif du stage proposé est de poursuivre cet inventaire et d'en produire une synthèse. Cet inventaire concerne à la fois les mécanismes géophysiques (transferts d'eau et de particules, d'énergie, dynamique des écosystèmes, altération des roches,...) et les dynamiques des sociétés en interaction avec leur environnement (urbanisation, aménagements, ...). Le travail consiste à comprendre les processus en jeu, à partir de discussions avec les équipes impliquées dans le projet et l'analyse de la bibliographie, et à en faire une synthèse écrite assortie d'une représentation graphique, avec des outils tel que, par exemple, le diagramme de boucle causale (voir l'exemple en annexe et [https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme\\_de\\_boucle\\_causale](https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_de_boucle_causale)). Le travail préliminaire a montré que cet exercice est très stimulant et met rapidement en évidence ce qui est bien connu et ce qui l'est moins dans le fonctionnement des agro- éco- hydro- ou socio- systèmes que l'on étudie dans nos observatoires.

1 Armstrong McKay et al., 2022, Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points, Science 377. <https://doi.org/10.1126/science.abn7950>

2 Wendling et al, 2019. Drought-induced regime shift and resilience of a Sahelian ecohydrosystem. Environ. Res. Lett. 14, 105005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab3dde>

Dans une seconde partie du stage, il s'agira de faire un travail de prospective (expériences de pensée appuyées par la littérature scientifique) pour évaluer, sur une sélection de situations, comment les changements globaux en cours (hausse de la température et vagues de chaleur, intensification des pluies et des sécheresses, artificialisation de terres, évolution des pratiques agricoles...) pourraient modifier, activer, désactiver les boucles de rétroaction identifiées, et en évaluer les conséquences, par exemple en matière de résilience de ces systèmes et de pérennité des ressources qu'ils fournissent.

**Formation** : universitaire ou école d'ingénieur, niveau Master 2 en Géosciences ou Sciences de la Vie. Les cursus pluri-disciplinaires associant géosciences et sciences humaines seront également appréciés.

**Lieu du stage** : Laboratoire Hydrosociences à Montpellier (<https://hydrosociences.org>), sous la supervision de Christophe Peugeot, hydrologue (observatoire AMMA-CATCH, [www.amma-catch.org](http://www.amma-catch.org)), avec la participation de l'ensemble du groupe de travail OZCAR. Une formule à distance est envisageable si nécessaire. Des déplacements en France (pris en charge par le projet) ainsi que des entretiens en visio avec des équipes à l'étranger sont à prévoir.

**Dates et durée indicatives (adaptables)** : 6 mois, entre février et septembre 2023.

Gratification selon les barèmes en vigueur. Une maîtrise raisonnable de la langue anglaise est requise.

Envoyer CV et lettre de motivation à : [christophe.peugeot@ird.fr](mailto:christophe.peugeot@ird.fr) en indiquant comme référence « OZCAR/rétroactions » dans le message

*Annexe page suivante : exemple de boucle de rétroaction identifiée*

## Le Permafrost

### Auteur :

Philippe Schoeneich, Professeur, Institut d'Urbanisme et de Géographie Alpine, Grenoble  
Observatoires : CRYOBSCLIM, PermaFRANCE

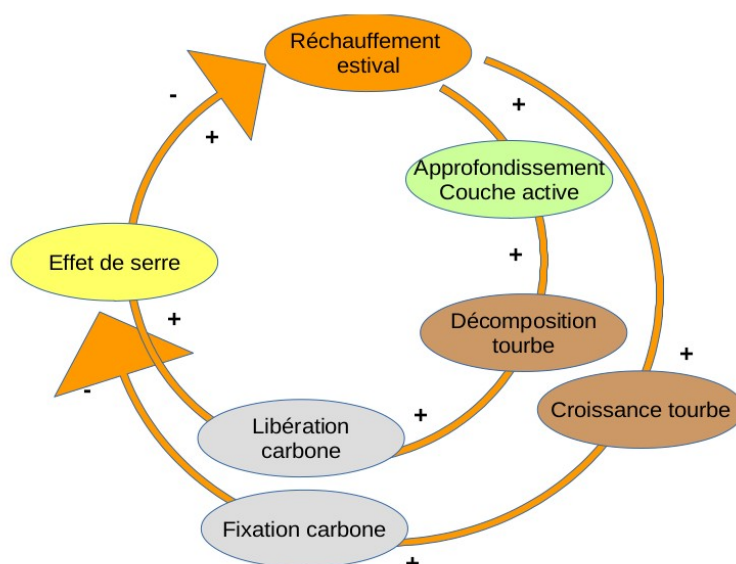
### Enjeux :

Le permafrost circumpolaire arctique forme un réservoir de carbone équivalent à la totalité du carbone atmosphérique, sous forme de matière organique non ou peu décomposée contenue principalement dans les premiers mètres de sol gelé.

### Mécanismes et rétroactions identifiées :

La boucle de rétroaction conduisant à la libération de ce stock de carbone dans l'atmosphère fonctionne ainsi (Figure):

Le réchauffement estival induit une fusion plus importante et un approfondissement de la couche active (la couche superficielle qui dégèle chaque été) ; une épaisseur plus importante de sol tourbeux est soumise à la minéralisation ou à la décomposition ; la décomposition de la tourbe libère soit du CO<sub>2</sub> (en conditions sèches) soit du méthane (en conditions humides) ; les gaz émis accentuent l'effet de serre.



Une autre boucle de rétroaction, négative, pourrait compenser en partie l'effet de la première : le réchauffement estival favorise la croissance de la tourbe et la reforestation de la toundra ; l'augmentation de la biomasse fixe du carbone ; l'effet de serre est atténué.

La question de la dominance de l'une ou de l'autre des deux boucles reste controversée. Les modèles divergent et les paramètres sont très difficiles à mesurer. Un point de bascule pourrait être atteint lorsque le froid hivernal ne suffit plus à regeler entièrement la couche active, et qu'on passe à un régime de gel saisonnier sur permafrost relique.

### Echelles spatiales et temporelles des processus décrits / zone géographique

Echelle hémisphérique : tout le Nord de la Sibérie, l'Alaska et le Nord du Canada.

Echelle temporelle : décennies à siècles.

**Commentaire libre :** Le permafrost de montagne est essentiellement minéral et n'est pas concerné. Une rétroaction semblable pourrait exister pour toutes les zones de tourbe, liée non pas au dégel, mais à un assèchement induisant la minéralisation de la tourbe, ou inversement une humidité accrue favorisant l'accumulation de tourbe.