
MODULE ECOSYSTÈMES CONTINENTAUX
TD 1, ET 2
DOMAINES 1 ET 3
CORRECTIONS

Milieux Physiques – Bioclimatologie

UFR Physique de l'Environnement et Régulation Biologique des Échanges

B. Gabrielle	Benoit.Gabrielle@AgroParisTech.fr
J.-F. Castell	Jean_Francois.Castell@AgroParisTech.fr
E. Personne	Erwan.Personne@AgroParisTech.fr
S. Saint-Jean	Sebastien.Saint-Jean@AgroParisTech.fr
P. Stella	Patrick.Stella@AgroParisTech.fr

Prévoir calculatrice pour les TDs

25 janvier 2018

TD 2

Echanges biosphère-atmosphère :
application au cas de l'azote réactif

TD de Bioclimatologie no. 2 - Echanges biosphère-atmosphère : application au cas de l'azote réactif

Objectifs du TD:

- comprendre les mécanismes d'émissions, de transport atmosphérique et de dépôts d'azote réactif, et leurs régulations physiques et biologiques
- évaluer les échanges via des modèles simples
- appréhender l'effet de pratiques ou d'aménagements sur les flux d'azote et leurs impacts

1. Déterminisme de la température de surface du sol

La température du sol ou des couverts végétaux joue un rôle déterminant sur les échanges de ces compartiments avec l'atmosphère, via des relations physico-chimiques (équilibre acide-base pour la concentration en ammoniac dans la phase gazeuse du sol, par exemple, ou la variation du point de compensation pour la plante). L'objectif de cette première partie est de comprendre comment le bilan d'énergie de la surface détermine cette température, qui résulte d'un équilibre entre les différents termes du bilan.

Des mesures de rayonnement net (R_n), de flux de chaleur sensible (H), de température de l'air (T_a) et d'humidité relative de l'air (HR) ont été réalisées près de Rennes à 2 mètres au-dessus d'un sol nu. Les valeurs moyennes observées sur la journée sont les suivantes:

Rayonnement net R_n : 150 W m^{-2} ; Flux de chaleur sensible H : 80 W m^{-2}

Température de l'air T_a : 14°C ; Température du sol T_s : 16°C

Humidité relative de l'air HR ; 70%.

Données supplémentaires : chaleur massique de l'air à pression constante $C_p = 1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, densité de l'air $\rho = 1.16 \text{ kg m}^{-3}$. L : chaleur latente de vaporisation de l'eau : $L = 2.46 \cdot 10^6 \text{ J kg}^{-1}$. Constante des gaz parfaits: $R = 8,32 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$

Pression de vapeur saturante pour une température de 14°C : $P(\text{Trs})=1600 \text{ Pa}$; pour une température de 16°C : $P = 1800 \text{ Pa}$ (valeurs déduites de la courbe de rosée).

Questions

1/ Ecrivez l'équation du bilan d'énergie de la surface.

En considérant que la surface du sol ne stocke pas de chaleur, le bilan s'écrit :

$$R_n = LE + H + G$$

où R_n correspond au rayonnement net, H et LE aux flux de chaleur sensible et latente, et G au flux de conduction dans le sol. Les flux peuvent être exprimés en puissance par unité de surface ($W m^{-2}$), ou intégrés sur une période de temps donnée et exprimés en¹⁴ énergie ($MJ m^{-2}$).

2/ Ecrivez l'expression du flux de chaleur sensible H en fonction du gradient de température entre la surface du sol et le point de mesure (voir rappels au début de l'énoncé des TD).

La formule vue en cours (et donnée dans les rappels du support de TD) est :

$$H = \rho C_p h(u) (T_s - T_a) = \rho C_p \frac{(T_s - T_a)}{r}$$

avec H en $W m^{-2}$, T_s et T_a en $^{\circ}C$ ou K (voir bas de l'énoncé pour les constantes C_p et ρ), $h(u)$: coefficient d'échange, dépendant de la vitesse du vent u (mais qui sera considéré comme constant ici).

3/ Déduisez la valeur de la résistance au transfert entre la surface du sol et le niveau de référence (2m). Calculez cette valeur.

L'application numérique donne de l'équation ci-dessus pour H donne :

$$80 = 1,16 \times 1005 \times h(u) \times (16 - 14) \Rightarrow 80 = h(u) \times 2332 \Rightarrow h(u) = 0,0343 \text{ s}^{-1} \text{ m}^2$$

La résistance au transfert est l'inverse du coefficient h : $r = 29,1 \text{ s m}^{-1}$

On peut aussi ré-écrire la formule ci-dessus comme :

$$r = \rho \cdot C_p \frac{\Delta T}{H} = 29 \frac{s}{m}$$

4/ Ecrivez l'expression du flux de chaleur latente LE en fonction de la pression de vapeur à 2m et en surface.

Dans le bilan d'énergie, LE vaut 0, en revanche il nous faudrait en principe recalculer le flux G pour pouvoir accéder au flux de chaleur sensible H . Si l'on reprend l'hypothèse précédente sur G , H peut se calculer à partir du bilan d'énergie comme :

$H = R_n - G = 0,8 R_n = 120 \text{ W m}^{-2}$. En reprenant l'expression de H donnée à la question 2

$H = \rho C_p h(u) (T_s - T_a) = \rho C_p \frac{(T_s - T_a)}{r}$ il vient : $(T_s - T_a) = 120 \times 8,32 / (1005 \times 1,16) \times 29,1 = 3$, d'où $T_s = 17^{\circ}C$ (la surface est donc plus chaude de $1^{\circ}C$ comparé à un sol non sec). surface.

Le terme LE s'écrit (cf poly) : $LE = L \frac{M}{RT} \frac{(P(T_{rs}) - P(T_{ra}))}{r}$

avec $P(T_r)$ pression de vapeur d'eau (Pa), et L : chaleur latente de vaporisation de l'eau.

5/ Avec une hypothèse que vous proposez, calculez le terme LE en admettant qu'e le sol se comporte comme une surface saturée en eau. Cette valeur vous semble-t-elle correcte? Que pouvez-vous en conclure sur les propriétés de la surface du sol ?

LE peut se calculer en appliquant l'équation de la question précédente et en supposant que la résistance R est la même que pour la diffusion de chaleur sensible H.

Il faut calculer le gradient de pression partielle en vapeur d'eau entre la surface et l'air au-dessus. Pour une température de l'air de 14°C, la pression partielle en vapeur d'eau à saturation est d'environ 1600 Pa (Figure 1). Comme l'humidité relative est de 70 %, la pression partielle P(Tra) de la vapeur d'eau dans l'air est de : $0,7 \times 1600 = 1120 \text{ Pa}$.

Au niveau du sol, l'air est à 16°C et saturé en eau. Sa pression de vapeur correspond donc au point de la courbe de rosée pour $T=16^\circ\text{C}$, soit $P(\text{Trs}) = 1800 \text{ Pa}$.

L'application numérique avec l'équation donnée à la question 4 donne :

$$LE = L \times 18 \cdot 10^{-3} / (8,32 \times (273+15)) \times (1800 - 1120) / 29,1 = 2,46 \cdot 10^6 \times 0,176 \cdot 10^{-3} = 439 \text{ W m}^{-2}$$

Cette valeur est trop élevée, puisqu'elle est 3 fois supérieure au rayonnement net ! On peut en déduire que le sol n'est pas saturé en eau (plutôt sec en fait).

6/ Proposez une autre façon de calculer LE. Vous pourrez approximer le flux G comme 20 % du Rn.

LE peut se déduire du bilan d'énergie, en faisant l'hypothèse proposée pour le flux de conduction G. Le terme LE devient : $LE = Rn - G - H = 150 - 0.2 \times 150 - 80 = 40 \text{ W m}^{-2}$.

7/ Que deviennent les termes H et LE si le sol est complètement sec (surface imperméable par exemple) ?

Pour une surface imperméable le terme E est nul, par définition (sauf si éventuellement il y a condensation sur la surface) – de même pour un sol complètement desséché ($P(\text{Trs}) = 0$).

8/ Dans les conditions d'un sol complètement sec, calculez la température de surface dans ce cas, en admettant que les termes Rn, Ta et la diffusivité turbulente sont inchangés.

Dans le bilan d'énergie, LE vaut 0, en revanche il nous faudrait en principe recalculer le flux G pour pouvoir accéder au flux de chaleur sensible H. Si l'on reprend l'hypothèse précédente sur G, H peut se calculer à partir du bilan d'énergie comme :

$H = Rn - G = 0.8 Rn = 120 \text{ W m}^{-2}$. En reprenant l'expression de H donné à la question 2

$H = \rho C_p h(u)(T_s - T_a) = \rho C_p \frac{(T_s - T_a)}{r}$ il vient : $(T_s - T_a) = 120 \times 8,32 / (1005 \times 1.16) \times 29,1 = 3$, d'où $T_s = 17^\circ\text{C}$ (la surface est donc plus chaude de 1°C comparé au sol humide).

2. Emissions et dépôt sec d'ammoniac

On va chercher ici à calculer le flux d'ammoniac (NH_3) lors d'un apport de lisier. Lors de cet apport d'azote organique en surface du sol (sous forme de lisier par exemple), on a mesuré la concentration en ammonium (NH_4^+) et le pH de l'apport, et on a mesuré la concentration dans l'air à 2m en ammoniac (valeur : $15 \mu\text{g m}^{-3}$).

On fera l'hypothèse que le lisier se met à la température de la surface de sol (T_s).

La concentration en ammoniac gazeux en mol d' NH_3/l d'air, en équilibre avec la phase liquide (le lisier) en question se calcule avec l'équation suivante :

$$[\text{NH}_3]_g = \frac{161,5 \times 10^3}{T_s} \times \exp\left(\frac{-1 \times 10^4}{T_s}\right) \times \Gamma$$

Avec T_s : température de la surface et dans l'équation, exprimée en degré K, et Γ le potentiel d'émission de la surface, ici égal à 10^7

Pour l'ammoniac, la conversion mol.l^{-1} en kg.m^{-3} d'air se fait à l'aide de la masse molaire de l'ammoniac ($M_{\text{NH}_3} = 17\text{g.mol}^{-1}$)

1/ calculez la concentration en ammoniac gazeux en surface $[\text{NH}_3]_g$ en $\mu\text{g.m}^{-3}$ lorsque cette surface est à la température précédente de $T_s = 16^\circ\text{C}$ et à la température en situation sèche. Déduisez-en l'effet potentiel de la température de surface.

Résultat calcul :

$$[\text{NH}_3]_g = \frac{161,5 \times 10^3}{289} \times \exp\left(\frac{-1 \times 10^4}{289}\right) \times 1\text{E}7 = 5.23 \text{ E-}6 \text{ mol.l}^{-1}$$

en $\mu\text{g}/\text{m}^3$: on multiplie par $17.10^{-3} \text{ kg/mol}$ et au volume de 1m^3 puis on rapporte à des μg :

$$[\text{NH}_3]_g = 5.23\text{E} - 6 \times \frac{17\text{E} - 3}{1\text{E} - 3} \times 1\text{E}6 = 88.9 \mu\text{g.m}^{-3}$$

Pour une température de surface de 1°C (correspondant aux conditions sèches de l'exercice précédent), on trouve une concentration supérieure de 13%:

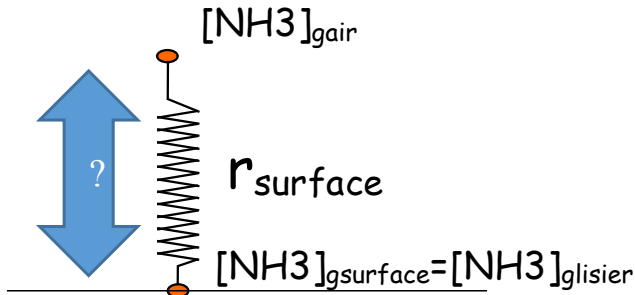
$$[\text{NH}_3]_g = 100,1 \mu\text{g.m}^{-3}$$

L'augmentation de la température de surface augmente la concentration gazeuse en NH_3 en surface. Cela suggère que l'émission sera susceptible d'augmenter (si émission il y a).

TD 2 - AZOTE

17

2/ Faites un schéma simple (« approche résistive ») pour représenter les échanges d'ammoniac entre l'air et la surface. A l'aide de ce schéma, écrivez l'expression du flux d'ammoniac entre la surface et l'atmosphère.



$$F_{\text{NH}_3} = \frac{[\text{NH}_3]_{\text{surface}} - [\text{NH}_3]_{\text{air}}}{r_{\text{surface}}} = \text{UNITE : } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$$

3/ A l'aide des résultats des questions précédentes, calculez ce flux lorsque la température du sol est de 16°C.

Résultat :

$$F_{\text{NH}_3} = \frac{88.9 - 15}{r_{\text{surface}} = 29(\text{voir 1.3})} = 2.55 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$$

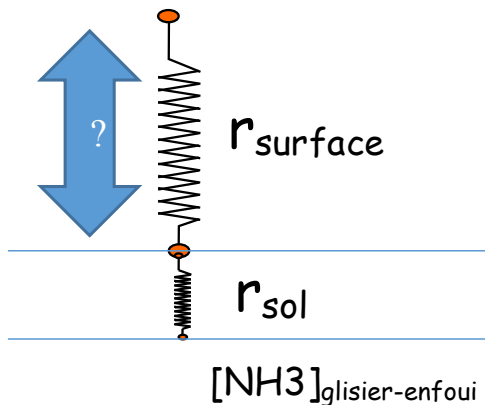
On convertit souvent le flux en $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ pour des raisons d'utilisation de valeurs > 1 .

4/ Y a-t-il une différence entre un apport sur une surface sèche et la situation précédente ? pourquoi ? Calculez la nouvelle valeur du flux (s'il y a une différence).

Introduire la concentration calculée précédemment avec la température pour la surface sèche

5/ Sur une parcelle voisine, le lisier est enfoui après épandage, à une profondeur de 10cm sous la surface du sol. Quelles conséquences attendre par rapport l'émission dans l'air ?

L'enfouissement ralentira probablement l'émission car il va se rajouter une résistance au transfert pour atteindre la surface du sol (ici appelée r_{sol}). En toute rigueur, sachant qu'en dessous de la surface, la température est plus fraîche (tamponnée) la concentration en équilibre avec l'ammonium du lisier sera alors aussi plus faible, ce qui engendrera a priori un gradient entre la concentration dans l'air et la concentration gazeuse dans le sol plus faible que dans la situation précédente.



6/ Entre 10cm et la surface du sol, on peut considérer qu'il existe une résistance du sol équivalente à 300 s/m et on simplifiera le calcul de la température du sol à 10 cm de profondeur en supposant qu'elle est la même qu'à la surface (16°C).

Calculez le nouveau flux d'ammoniac. Votre résultat est-il en accord avec votre conclusion du point 5/ ?

On reprend donc la même équation que précédemment (2.2) et on ajoute la résistance de sol pour le transfert.

$$F_{NH_3} = \frac{[NH_3]_{surface} - [NH_3]_{air}}{r_{surface} + r_{sol}} = \text{UNITE : } \mu g \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$$

$$F_{NH_3} = \frac{88.9 - 15}{29 + 300} = 0.22 \mu g \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$$

Effectivement, le flux d'émission a été divisé par 10. C'est donc conforme à notre interprétation précédente.

7/ Sous l'hypothèse que la température de surface (16°C) est constante pendant 3 jours, que le vent est inchangé sur cette période et que les pertes en azote par volatilisation, par lessivage, infiltration, et tout autre processus n'entament pas les hypothèses et équations précédemment utilisées, comparez la perte ammoniacale dans l'air par rapport à l'apport de lisier qui est ici de 120 kg d'N par hectare.

Qu'en pensez-vous ? Commentez.

Perte par volatilisation = cumul du flux sur 5 jours :

19

Sans enfouissement :

*Cumul flux NH₃ sur 24h pendant 5j = 2,55 * 24*5*3600 = 1.1^E6 µg/m² perdu pendant les 5 jours.*

Soit 1.1g/m² et finalement 11kg par hectare.

Dans les conditions et avec les hypothèses simplificatrices précisées, la perte en ammoniac atmosphérique approche les 10% de l'apport des 120 kg d'N/ha.

Commentaires :

1/ le cycle jour-nuit des températures n'est pas pris en compte. Cela va jouer dans la diminution de l'émission la nuit mais l'augmenter le jour ou si les autres journées sont plus chaudes.

2/ le stock d'N dans le lisier et en contact avec l'air baisse : il s'infiltré et les pertes par volatilisation réduisent son stock... donc l'émission va se tarir progressivement (le calcul initial avec Γ constant n'est pas réaliste. Donc l'émission va baisser.

3/ l'hypothèse qu'il y a un arrêt brutal à 5 jours est fausse. L'émission va progressivement se réduire mais peut se prolonger sur 10 à 15 jours selon les conditions de sol, de météo, etc....

B/ Autres facteurs déterminant les échanges d'ammoniac

Dans la cadre d'une autre expérimentation, sur la parcelle voisine d'un bâtiment d'élevage, la concentration en NH₃ dans l'air a été mesurée à 200µg.m⁻³.

Les parcelles avoisinantes ce bâtiment sont entourées de plusieurs types de culture. Une prairie non fertilisée, un petit bois et une culture de blé.

La résistance au transfert entre la surface du couvert et un niveau de référence peut être approximée de la façon suivante :

$$r = \frac{1}{\kappa^2 \cdot u(z)} \cdot \left\{ \ln \left[\frac{z - d}{z_0} \right] \right\}^2$$

K est la constante de Von Karman (=0,4) ; u(z) est la vitesse du vent (en m/s) à la hauteur z et z₀ est la rugosité de la surface et d la hauteur de déplacement du couvert.

1/ Calculez cette résistance pour les 3 écosystèmes du tableau ci-dessous sachant que le vent à 10m est de 2m/s.

Tableau 1. Paramètres de turbulence au-dessus de 3 écosystèmes.

Ecosystème <i>TD 2. AZOTE</i>	Hauteur zmesure	Rugosité z0	hauteur de déplacement d ₂₀
Prairie	10m	0,2 m	0,5 m
Bois	10m	1m	5m
Blé	10m	0,05m	1m

Comparez le potentiel d'échange pour entre le couvert et le niveau 10m où les mesures ont été faites ?

$$r = \frac{1}{0.4^2 \cdot 2} \left\{ \ln \left[\frac{10 - 0.5}{0.2} \right] \right\}^2 = 93 \text{ s/m pour prairie, } 16 \text{ s/m pour le bois et } 168 \text{ s/m pour le blé.}$$

A gradient égal entre l'air à 10m et la surface de l'écosystème, l'échange sera facile avec le bois, moindre pour la prairie et encore plus faible avec le blé.

2/ Les écosystèmes (sol + végétation) sont simplifiés au maximum. Il n'est pas considéré d'échange d'N entre le sol et les plantes par voie atmosphérique. La concentration d'N dans la cavité sous-stomatique des 3 écosystèmes est la suivante :

2, 0.1 et 150 µg/m³ pour respectivement la prairie, le petit bois et la culture de blé. Pouvez-vous apporter des explications simples à ces différences ?

Le blé est un écosystème artificiellement enrichi par des apports azotés. La culture est faite pour que la plante ne souffre pas d'azote et donc, elle est riche en azote. Les équilibres qui se forment au niveau des feuilles et de la cavité sous-stomatique, peuvent conduire à des concentrations élevées compte tenu de la forte activité de la plante.

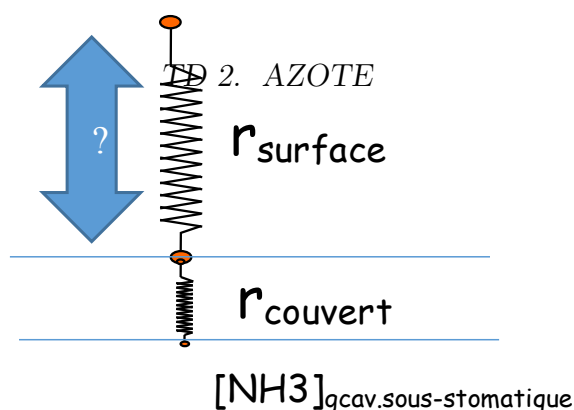
La prairie est un écosystème qui est souvent riche en azote naturellement (qqs légumineuses peuvent être présentes et avoir enrichies le sol), mais elle n'est classiquement pas ou pas trop fertilisée.

Les écosystèmes « naturels » sont jamais fertilisés. Il est logique que la concentration en azote dans la feuille soit faible.

4/ Les valeurs de résistance stomatique à l'échelle du couvert sont respectivement de 80, 100 et 50 s/m pour la prairie, le petit bois et la culture de blé. Calculez le flux entre l'atmosphère et les couverts pour les trois cultures ?

Commentez.

On va simplifier le schéma d'échange de la façon suivante :



$$F_{NH_3} = \frac{[NH_3]_{cav.sous-stom} - [NH_3]_{air}}{r + r_{stom.couvert}} = \text{UNITE : } \mu g.m^{-3}.s^{-1}$$

On trouve alors :

$$F_{NH_3}(\text{prairie}) = \frac{2 - 200}{93 + 80} = -1,14 \mu g.m^{-3}.s^{-1}$$

$$F_{\text{bois}} = -7.7 \mu g/m^3/s$$

$$F_{\text{blé}} = -0.23 \mu g/m^3/s$$

On remarquera un signe négatif :

C'est un dépôt dans les 3 cas. La concentration dans l'air est telle que le gradient est inversé.

Le dépôt le plus fort est sur le bois car c'est lui qui crée le plus grand gradient et qui a la résistance au transfert ($r + r_{couvert}$) le plus faible.

C'est ensuite la prairie qui absorbe puis le blé.

A noter que c'est donc profitable à la prairie d'être à proximité de la ferme pour absorber de l'N par voie atmosphérique !. C'est moins que la prairie, mais ça peut être non négligeable.

3. Préconisations et conclusions

Discuter de préconisations pour réduire les émissions d'ammoniac (donc diminuer les émissions à la source), ou maximiser la capture d'ammoniac: par rapport aux épandages et en termes d'aménagement/gestion du parcellaire et du paysage.

Suggestions : pour les émissions à l'épandage : éviter les apports en plein été (sol chaud), les jours de grand vent (coefficient d'échange h augmente la volatilisation), enfouir les engrais organiques pour augmenter la résistance au transfert (question ouverte : quid de l'interaction avec une pluie?), réduire les apports etc..

Pour favoriser la capture d'ammoniac via le dépôt : jouer sur le calendrier des cultures pour maximiser le dépôt sur des couverts, implanter des prairies ou haies sous le vent des parcelles émettrices, mettre plus de cultures pérennes, haies, ripisylves, etc...