ExanThèse #1

Décryptage de thèses *soutenues au* CIRED

Faut-il choisir entre différents objectifs du développement durable (réduire la pollution par l'azote, conserver la biodiversité, assurer l'accessibilité alimentaire, ...) lorsque l'on réduit les émissions de gaz à effet de serre dans le secteur agricole et forestier ?

Intitulé de la thèse : « Évaluation quantitative de la durabilité de stratégies d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur de l'agriculture, de la forêt et des autres usages des sols à l'échelle mondiale »

Soutenue par Rémi Prudhomme le 15 mai 2019

Texte intégral de la thèse :
https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02368885

Document mis à jour :
3 juin 2020

CC BY NC SA

CIRED

Sommaire

Décryptage de la thèse

Contexte 4
Problématique 5
Pourquoi c'est important 5
Méthode utilisée 6

Contenu de la thèse 6
Partie 1 Quel est le bénéfice climatique de la production de l»gumineuses en Europe, à l'horizon 2050 ?
Ce que nous faisons 6
Ce que nous montrons 7
Partie 2 Quels sont les effets des stratégies de réduction des émissions GES sur la biodiversité et sur l'accessibilité alimentaire dans le monde, à l'horizon 2100 ?
Ce que nous faisons 8
Ce que nous montrons 9
Partie 3 Quelles solutions permettent de rester au sein des limites planétaires à l'horizon 2030 ?
Ce que nous faisons 9
Ce que nous montrons 10

Zoom sur des points particuliers 11
►*1 Les principales émissions GES dans le secteur AFOLU*
►*2 La modélisation prospective*
►*3 Le modèle d'usage des sols Nexus Land-Use (NLU)*
►*4 Projecting Responses of Ecological Diversity In Changing Terrestrial Systems (PREDICTS)*
►*5 Incertitude et robustesse*
►*6 Les limites planétaires*
►*7 Présentation détaillée d'un point de méthodogie*

Bibliographie et liens utiles 16
Le numéro 1 de la collection & droits 18

Sommaire

Décryptage de la thèse

Contexte 4
Problématique 5
Pourquoi c'est important 5
Méthode utilisée 6

Contenu de la thèse 6
Partie 1 Quel est le bénéfice climatique de la production de l»gumineuses en Europe, à l'horizon 2050 ?
Ce que nous faisons 6
Ce que nous montrons 7
Partie 2 Quels sont les effets des stratégies de réduction des émissions GES sur la biodiversité et sur l'accessibilité alimentaire dans le monde, à l'horizon 2100 ?
Ce que nous faisons 8
Ce que nous montrons 9
Partie 3 Quelles solutions permettent de rester au sein des limites planétaires à l'horizon 2030 ?
Ce que nous faisons 9
Ce que nous montrons 10

Zoom sur des points particuliers 11
►*1 Les principales émissions GES dans le secteur AFOLU*
►*2 La modélisation prospective*
►*3 Le modèle d'usage des sols Nexus Land-Use (NLU)*
►*4 Projecting Responses of Ecological Diversity In Changing Terrestrial Systems (PREDICTS)*
►*5 Incertitude et robustesse*
►*6 Les limites planétaires*
►*7 Présentation détaillée d'un point de méthodogie*

Bibliographie et liens utiles 16
Le numéro 1 de la collection & droits 18

Contexte

Le **secteur étudié** dans cette thèse est celui de l'**agriculture, de la forêt et des autres usages des sols** (zones humides et zones urbaines). Appelé **secteur AFOLU** pour *Agriculture, forestry and other land use*[1], il était **responsable, en 2010, d'environ 20 % des émissions de gaz à effet de serre [GES] mondiales** **[►1, p.11]**.

Afin de lutter contre le changement climatique, des **stratégies de réduction des émissions de GES** sont déployées dans le secteur AFOLU. Leur forte ambition exerce une **pression importante** sur ce secteur et pose la **question de leur durabilité**. Dans cette thèse, nous envisageons la durabilité selon les **indicateurs quantitatifs** suivants :

Indicateurs de durabilité étudiés dans cette thèse :

- **Emissions de GES** (modèle NLU [►3])
  - CO_2
  - Non CO_2
- **Biodiversité** (modèle PREDICTS [►4])
  - Richesse spécifique
  - Intégrité de la biosphère
- **Accessibilité alimentaire** (modèle NLU [►3])
  - Prix de l'alimentation
  - Coût de production agricole
- **Azote perdu dans le milieu** (bilans d'azote issus du modèle NLU [►3])
- **Surface de forêt** (scénarios issus de la littérature scientifique)

Considérons **deux exemples de stratégies** mises en place pour limiter les émissions de gaz à effet de serre, mais **pouvant avoir des effets indésirables qui mettent en cause leur durabilité** :

1. ***La bioénergie***. La production de cette énergie renouvelable issue de la biomasse (matière organique d'origine végétale, animale, bactérienne ou fongique) menace la biodiversité. En effet, elle combine un mode de production en monoculture et une forte utilisation d'intrants, ces produits (engrais, pesticides, ...) que l'on ajoute dans le sol pour améliorer le rendement.

1 Notons que si AFOLU est communément employé par les experts, il existe un équivalent en français : AFAT, pour Agriculture, foresterie et autre affectation des terres

ExanThèse #1 - CC BY 2.0 FR

2. ***La reforestation d'espaces agricoles***. Par rapport à une situation sans reforestation, ce changement d'usage des sols réduit la surface disponible pour l'agriculture. Il augmente donc la tension sur les marchés agricoles et peut menacer l'accessibilité alimentaire par une augmentation des prix agricoles. De plus, cette stratégie d'atténuation des émissions interagit avec les conditions socio-économiques du système alimentaire (ouverture du commerce agricole, augmentation de la population, efficacité de la production agricole, ...). Ainsi, par exemple, moins l'agriculture est productive par unité de surface, plus la reforestation augmente la tension sur les marchés agricoles.

Problématique

Dans cette thèse, nous cherchons à préciser, à travers une évaluation quantitative, les **effets sur les émissions de gaz à effet de serre, sur la biodiversité et sur l'alimentation, de différentes stratégies d'atténuation des gaz à effet de serre à l'échelle mondiale dans le secteur de l'agriculture et de la forêt au regard de différentes conditions socio-économiques**, telles que la population, le régime alimentaire, ...

Pourquoi c'est important

Les **attentes envers le secteur agricole et forestier**, déjà fortes, **ne cessent d'augmenter** :

- ***Nourrir la population humaine*** : un défi déjà difficile à tenir puisque le nombre de personne mal-nourries a augmenté de 17 millions dans le monde en 2017, par rapport à 2016.
- ***Infléchir l'érosion de la biodiversité actuelle*** due à la conversion de milieux naturels en milieux agricoles : 100 millions d'hectares d'expansion agricole sous les tropiques entre 1980 à 2000, soit 1,5 fois la surface de la France (dont la moitié de forêt primaire).
- ***Réduire l'eutrophisation des milieux aquatiques*** : bien qu'ayant permis d'augmenter la production agricole, la fertilisation azotée est responsable d'une concentration trop élevée d'azote dans les milieux aquatiques, ce

qui peut avoir des conséquences néfastes (marées vertes, proliférations d'algues, ...).

- ***Rester sous le seuil des 2 degrés de réchauffement climatique***. En effet, le secteur agricole représente un potentiel à la fois pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (il est, rappelons-le, l'un des secteurs les plus émetteurs avec environ 1/5 des émissions mondiales en 2010), et séquestrer du carbone de l'atmosphère dans la végétation et les sols.

Méthode utilisée

Pour mener à bien nos recherches, **nous utilisons la modélisation prospective [►2, p.12]**. Elle nous permet de quantifier les conséquences de différents choix d'usage des sols dans le futur.

L'utilisation du **modèle d'usage des sols NLU [►3, p.12] combiné avec 3 modèles de biodiversité issus de la base de données PREDICTS [►4, p.12]** permet d'étudier l'effet de différentes stratégies d'atténuation sur plusieurs aspects de la biodiversité mondiale et sur l'accessibilité alimentaire mondiale. **Nous avons ajouté au NLU le calcul de bilan d'azote**, car c'est l'un des principaux facteurs limitants de la croissance des plantes et qu'il permet de préciser le lien entre la production agricole par hectare et son impact environnemental.

Contenu de la thèse

1 Quel est le bénéfice climatique de la production de légumineuses en Europe, à l'horizon 2050 ?

Ce que nous faisons

Les **légumineuses** ont un **double intérêt environnemental** : ***elles se substituent à des produits animaux dans l'alimentation humaine*** (car elles contiennent elles aussi des protéines, nécessaires à la santé humaine) et ***elles permettent de réduire la consommation de fertilisants minéraux*** (car elles fixent biologiquement – et donc naturellement - l'azote). Or, aujourd'hui, l'Europe est dépendante du soja brésilien.

ExanThèse #1 - CC BY 2.0 FR

Dans la première partie de la thèse, **nous testons donc 3 scénarios d'augmentation de la production de légumineuses en Europe** :

1. Substitution, dans l'alimentation humaine, de la consommation de produits animaux (= lait + viande de ruminants) par des pois ;

2. Même stratégie + reforestation ;

3. Substitution, dans la rotation culturale, de céréales par des oléagineux et du soja dans les régions où la culture du soja est propice (vallée du Danube, Turquie, Nord de l'Italie, ...).

Nous évaluons ensuite les effets de ces scénarios sur les émissions GES du secteur AFOLU.

Indicateurs de durabilité étudiés dans cette partie :

- [x] **Emissions de GES** (modèle NLU [►3])
  - [x] CO_2
  - [x] Non CO_2
- [ ] **Biodiversité** (modèle PREDICTS [►4])
  - [ ] Richesse spécifique
  - [ ] Intégrité de la biosphère
- [ ] **Accessibilité alimentaire** (modèle NLU [►3])
  - [ ] Prix de l'alimentation
  - [ ] Coût de production agricole
- [ ] **Azote perdu dans le milieu** (bilans d'azote issus du modèle NLU [►3])
- [ ] **Surface de forêt** (scénarios issus de la littérature scientifique)

Ce que nous montrons

- La **fixation biologique de l'azote** a **peu d'effet** sur la réduction des émissions GES.

- En revanche, **la substitution des produits animaux par des pois** dans l'alimentation humaine constitue un **levier important**.

- **Ce changement de régime alimentaire permet de réduire la pression sur les terres que l'on peut alors utiliser pour réduire les émissions de GES. Le type d'émissions atténuées** (CO_2 ou autres) **dépend du nouvel usage de ces terres** : si l'on maintient un usage agricole de ces terres (pâture et/ou culture) mais moins intensif, les émissions de N_2O et de CH_4 du secteur agricole sont réduites **[►1, p.11]**, alors que si ces terres sont reforestées, du CO_2 de l'atmosphère est séquestré.

2 Quels sont les effets des stratégies de réduction des émissions GES sur la biodiversité et sur l'accessibilité alimentaire, dans le monde, à l'horizon 2100 ?

Ce que nous faisons

Le secteur AFOLU subit une forte pression : on ne lui demande plus seulement de produire de la nourriture mais aussi, désormais, de séquestrer du carbone, de protéger la biodiversité, tout en respectant les **limites planétaires [►6, p.13]**.

C'est pourquoi, dans la deuxième partie du manuscrit de thèse, **nous étudions, pour différents scénarios d'atténuation, les compromis et les synergies entre conservation de la biodiversité et amélioration de l'accessibilité alimentaire**.

Dans chacun de ces scénarios, **nous respectons l'objectif du secteur AFOLU pour rester sous 2° C de réchauffement global d'ici 2100**, et **nous combinons production de bioénergie de seconde génération** (des plantes sont cultivées non pour nourrir des hommes, mais pour être brûlées ; la chaleur ainsi obtenue est convertie en électricité dans des centrales thermiques)**, changement de régime alimentaire et reforestation des pâtures**.

Notre but est de comprendre comment ce type de stratégies d'atténuation influence la biodiversité et l'accessibilité alimentaire.

Indicateurs de durabilité étudiés dans cette partie :

- ☐ **Emissions de GES** (modèle NLU [►3])
  - ☐ CO_2
  - ☐ Non CO_2
- ☑ **Biodiversité** (modèle PREDICTS [►4])
  - ☑ Richesse spécifique
  - ☑ Intégrité de la biosphère
- ☑ **Accessibilité alimentaire** (modèle NLU [►3])
  - ☑ Prix de l'alimentation
  - ☑ Coût de production agricole
- ☐ **Azote perdu dans le milieu** (bilans d'azote issus du modèle NLU [►3])
- ☐ **Surface de forêt** (scénarios issus de la littérature scientifique)

ExanThèse #1 - CC BY 2.0 FR

Ce que nous montrons

- **Les scénarios extrêmes** (= centrés sur une seule stratégie d'atténuation : beaucoup de reforestation, ou changement de régime alimentaire important, ou encore production élevée de bioénergie) **ont des effets négatifs sur l'accessibilité alimentaire et/ou sur la biodiversité**.
- En revanche, **les stratégies qui combinent changement de régime alimentaire et reforestation permettent d'atténuer les effets négatifs sur l'accessibilité alimentaire et la biodiversité, voire de produire des effets bénéfiques**. (Notons que, dans cette thèse, la forêt est à la fois une variable d'entrée (donnée issue de scénarios de la littérature scientifique) et une variable de sortie (indicateur de durabilité). Dans cette deuxième partie, elle est utilisée uniquement comme variable d'entrée et n'est pas étudiée comme variable de sortie, au contraire de la partie 3)
- **Parmi les scénarios extrêmes, le pire est de réduire les émissions uniquement à partir de la production de plantes à destination de bioénergie de seconde génération** : ce scénario a **des effets négatifs à la fois sur différents indicateurs de biodiversité** (richesse spécifique et intégrité de la biosphère) **et sur l'accessibilité alimentaire** (prix de l'alimentation et coût de production agricole).

3 Quelles solutions permettent de rester au sein des limites planétaires à l'horizon 2030 ?

Cette partie de la thèse présentait un état de la recherche à un moment donné, et apparaît ici afin de montrer la recherche « en train de se faire ». Des travaux sur la question sont toujours en cours et intègrent de nouvelles données.

Ce que nous faisons

Dans la troisième partie, **nous sélectionnons de manière robuste [►5, p.13] [►7, p.13-15] les secteurs agricoles et forestiers qui permettent de ne pas dépasser les limites de la planète [►6, p.13] [►7, p.13-15]** au regard d'indicateurs renseignant, les émissions de gaz à effet de serre du secteur agricole et forestier, l'intégrité de la biosphère, le prix de l'alimentation, la pollution azotée et la surface des forêts. Cette méthode particulière de sélection est détaillée dans le schéma final **[►7, p.13-15]**.

Indicateurs de durabilité étudiés dans cette partie :

- ☑ **Emissions de GES** (modèle NLU [►3])
  - ☑ CO_2
  - ☑ Non CO_2
- ☐ **Biodiversité** (modèle PREDICTS [►4])
  - ☐ Richesse spécifique
  - ☑ Intégrité de la biosphère
- ☐ **Accessibilité alimentaire** (modèle NLU [►3])
  - ☑ Prix de l'alimentation
  - ☐ Coût de production agricole
- ☑ **Azote perdu dans le milieu** (bilans d'azote issus du modèle NLU [►3])
- ☑ **Surface de forêt** (scénarios issus de la littérature scientifique)

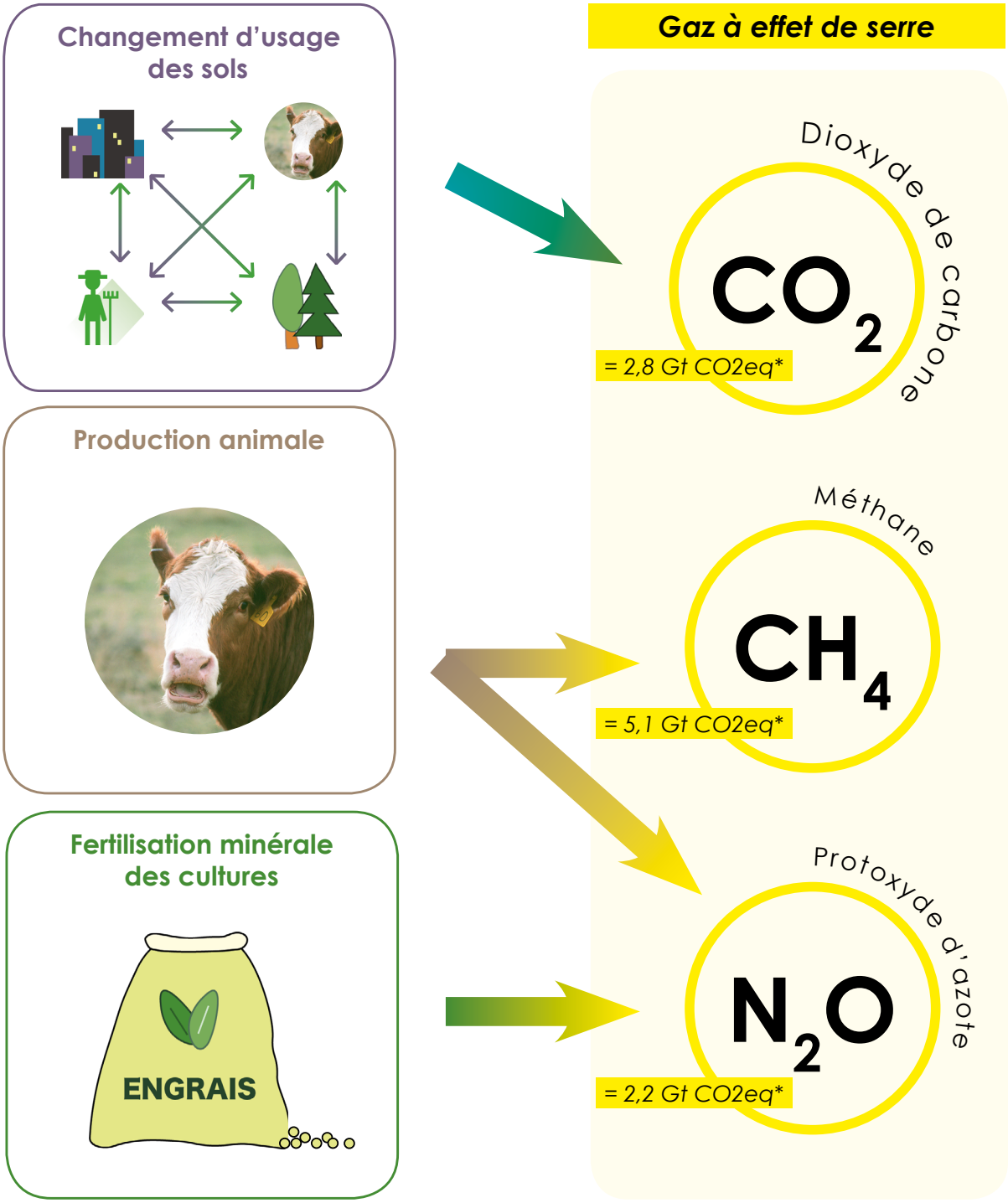
Ce que nous montrons

- Malgré **l'incertitude [►5, p.13]** régnant autour de la détermination des **limites planétaires [►6, p.13]**, **les scénarios environnementaux qui permettent de rester de manière robuste [►5, p.13] au sein de ces limites sont constitués majoritairement de reforestation, de changement de régime alimentaire et d'augmentation de l'efficacité de l'utilisation de l'azote** (fertilisants, pesticides, ...) dans la production végétale.
- Si les limites planétaires associées à la pollution azotée ou aux émissions de méthane et de protoxyde d'azote du secteur sont basses, l'augmentation de l'efficacité de l'utilisation d'intrants est plus souvent sélectionnée que la reforestation. À l'inverse, dans le cas d'une exigence plus importante sur la protection de la forêt et de la biodiversité, la reforestation est plus sélectionnée que l'augmentation de l'efficacité de l'utilisation d'intrants. Dans les deux cas, le changement de régime alimentaire est sélectionné par l'algorithme de *Robust Decision Making* **[►7, p.13-15]**.

ExanThèse #1 - CC BY 2.0 FR

Zoom sur des points particuliers

[▶1] Les principales émissions GES dans le secteur AFOLU



= *chiffres issus de FAOSTAT. 2015.* Faostat Online Database. *http://faostat.fao.org/*

[►2] La modélisation prospective

Elle consiste à construire des scénarios dans le futur à partir de modèles mathématiques. Son but n'est pas de prédire, mais d'aider les décisionnaires à comprendre les effets de leurs choix politiques. Le modèle a ici la vertu de fournir un cadre de travail cohérent.

[►3] Le modèle d'usage des sols Nexus Land-Use (NLU)

Il s'agit d'un modèle de production agricole à l'échelle mondiale. Il calcule les surfaces agricoles, les rendements, les prix et les coûts de production nécessaires pour satisfaire une demande en alimentation et en biomasse.
Pour effectuer ce calcul, on considère que chaque grande région minimise son coût de production sous des contraintes techniques comme, par exemple, la conversion de fourrage et d'aliments pour le bétail en production animale (viande et lait). On calcule ainsi le prix de l'alimentation afin de s'en servir comme d'un indicateur de l'accessibilité alimentaire.
NLU est un modèle d'équilibre partiel, c'est-à-dire qu'il ne prend pas en compte tous les marchés. Les seuls représentés dans le modèle sont ceux du secteur agricole (marché de la production végétale et marché de la production animale). Même s'il ne prend pas en compte les autres marchés, le NLU fait toutefois un lien avec ceux-ci à travers les prix de l'énergie et du travail.
Trois spécificités du NLU :

- La demande en produits agricoles est fixée en dehors du modèle par des scénarios de demande de produits végétaux, animaux et en bioénergie, sans boucle de rétroaction du modèle sur cette demande.
- La déforestation est fixée en dehors du modèle sans pouvoir, donc, être influencée par l'intensification agricole.
- L'intensification agricole se fait uniquement de manière conventionnelle (augmentation de l'utilisation d'intrants chimiques, en particulier des engrais) et non pas grâce à une intensification agro-écologique (comme par exemple l'association de cultures ou les plantes de couverture).

[►4] Projecting Responses of Ecological Diversity In Changing Terrestrial Systems (PREDICTS)

Les modèles de biodiversité sont des modèles statistiques construits à partir d'une très large base de données construite dans le cadre du projet PREDICTS. Cette base de données répertorie 47 000 espèces dans 26 000 endroits du monde entier. La particularité de cette base est qu'elle associe à des indicateurs de biodiversité des modifications anthropiques du milieu par rapport à son état naturel.

ExanThèse #1 - CC BY 2.0 FR

Les indicateurs de biodiversité utilisés dans cette thèse sont la richesse spécifique (le nombre d'espèces) et l'intégrité de la biosphère (l'abondance d'individus quelle que soit leur espèce et la composition des communautés vivant dans un même écosystème). À noter : l'influence sur les indicateurs de biodiversité des différentes utilisations des sols et de leur intensité sont pris en compte, mais pas celle du changement climatique.

[►5] Incertitude et robustesse

Étudier ce à quoi pourraient ressembler les secteurs agricoles en 2030 nous conduit à des situations d'incertitudes radicales, c'est-à-dire à des situations qui ne peuvent être prédites par un modèle. Dans ce cas, atteindre les objectifs que l'on se fixe est incertain car l'on peut à la fois (a) ne pas atteindre la cible en choisissant un secteur agricole ou (b) rejeter des secteurs agricoles qui atteindraient la cible. Les méthodes de « *robust decision making* » (RDM) permettent justement de sélectionner les secteurs agricoles et forestiers qui sont dans l'espace que l'on désire atteindre. Ces méthodes fournissent une mesure de la robustesse du choix en estimant l'incertitude associée à chaque choix. Un choix est dit robuste s'il minimise cette incertitude.

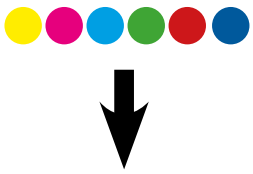
[►6] Les limites planétaires

Elles ont été définies dans la littérature scientifique comme des limites biophysiques que l'on ne peut dépasser sans prendre le risque de modifier profondément les équilibres terrestres et d'aboutir à des situations potentiellement dangereuses pour l'Homme. Ces limites biophysiques ont été définies jusqu'à maintenant comme une limitation du réchauffement climatique, un haut niveau d'intégrité de la biosphère, la conservation des équilibres des cycles de l'azote et du phosphore, le maintien de surfaces de forêt, etc. Il est à noter que les chercheurs ne s'accordent ni sur l'existence, ni, le cas échéant, sur la valeur chiffrée de ces limites.

[►7] Présentation détaillée d'un point de méthodogie [pages suivantes]

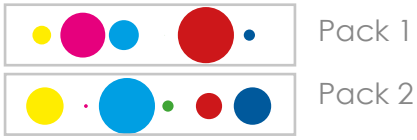
Atténuation des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle mondiale
dans le secteur de l'agriculture, de la forêt et des autres usages des sols :
comment sélectionner des stratégies
qui soient robustes [►5] à l'incertitude [►5]
et qui permettent de rester au sein des limites planétaires [►6] ?

1



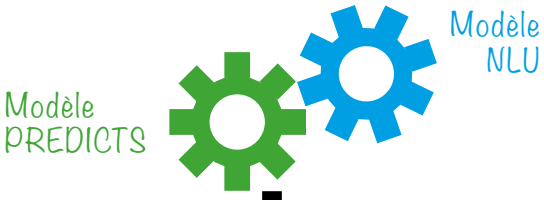
On sélectionne une série de **données** - appelées données d'entrée - **qui décrivent le secteur AFOLU** (efficacité de l'utilisation de l'azote dans la production végétale, régime alimentaire, surface de forêt, ...).

2



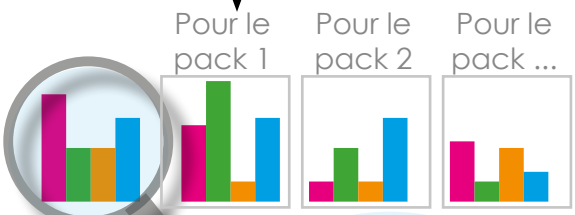
On les rassemble au sein de «packs» et **on fait varier la valeur des données d'entrée au sein de chaque pack ou combinaison**.

3



Avec un code **informatique**, **on combine 2 modèles**, PREDICTS et NLU, qui calculent les effets de ces combinaisons ou «packs» de données.

4



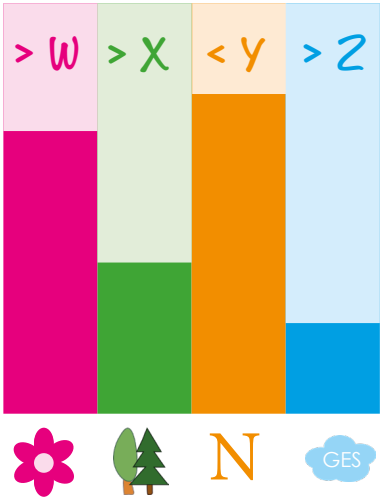
Pour chaque pack, **on obtient des valeurs pour 4 indicateurs.** Ces indicateurs décrivent les effets des **différentes** combinaisons.

Ce graphique a pour seul but de schématiser le processus :

- Les ordres de grandeur n'y sont pas respectés,
- Les unités de mesure sont différentes d'un indicateur à l'autre.

➔ Les données représentées sont non commensurables.

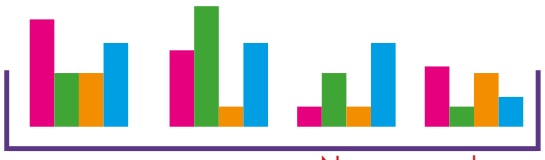
5



Pour chaque indicateur, on fixe un seuil spécifique qui correspond aux limites de la planète. **Ces seuils seront ensuite utilisés comme des «passoires»: ces passoires laisseront passer uniquement les résultats qui respectent les seuils fixés.**

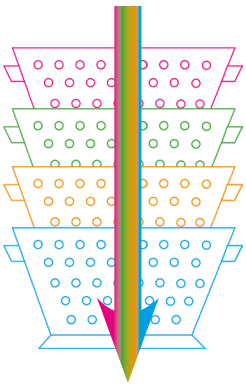
ExanThèse #1 - CC BY 2.0 FR

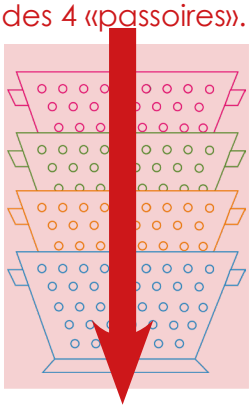
6



Passent par les 4 «passoires».

Ne passent pas par **l'ensemble** des 4 «passoires».



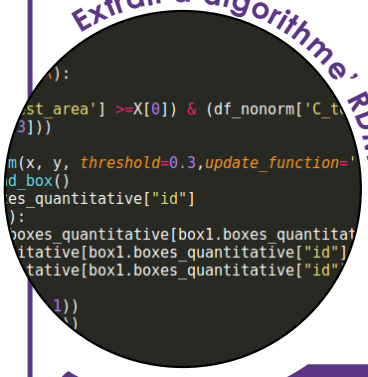


Sélectionnés

Rejetés

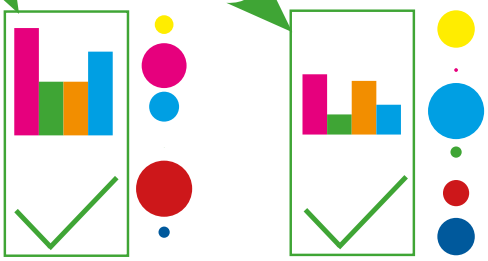
Un algorithme **sélectionne les résultats qui répondent à ces seuils.** Les autres sont rejetés.

Extrait d'algorithme* RDM*



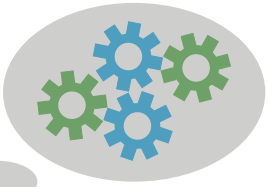
*** L'algorithme de *Robust Decision Making* (décision robuste à l'incertitude) sélectionne de manière robuste les scénarios qui permettent de respecter les seuils de durabilité.**

7



On regarde pour chaque résultat retenu les caractéristiques du secteur, caractéristiques que les modélisateurs appellent «données d'entrées» ou *input* (voir étape 1).

8



On en tire des conclusions et... on rédige **une thèse** !

Ce que nous montrons

- La **fixation biologique de l'azote** a **peu d'effet** sur la réduction des émissions GES.
- En revanche, **la substitution des produits animaux par des pois** dans l'alimentation humaine constitue un **levier important**.

Texte intégral de la thèse : https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02368885

Application interactive pour explorer les résultats

Partie 2

Impact de scénarios d'atténuation sur la biodiversité et l'accessibilité alimentaire

COMBINE

https://nexuslanduse.shinyapps.io/MitigationScenarios/

Publications issues de la thèse

- Prudhomme, R., Brunelle, T., Dumas, P., Le Moing, A. and Zhang, X., Assessing the impact of increased legume production in Europe on global agricultural emissions, *Regional Environmental Change* [à paraître] doi : 10.1007/s10113-020-01651-4
- Prudhomme, R., De Palma, A., Dumas, P., Gonzale, R., Leadley, P., Levrel, H., Purvis, A., Brunelle, T., *Impact of land-use-based climate mitigation policies on biodiversity and food security* [under review]
- Prudhomme, R., Dumas, P., Levrel, H., Brunelle, T., Robust strategies for the AFOLU sector to stay inside planetary boundaries [work in progress]

Publications de référence sur le sujet

- Gerten, D., *et al*. Feeding ten billion people is possible within four terrestrial planetary boundaries. *Nat Sustain* (2020) https://doi.org/10.1038/s41893-019-0465-1
- Popp *et al.*, Land-use futures in the shared socio-economic pathways, Global Environmental Change, 42 (2017) https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.10.002
- Obersteiner *et al.*, Assessing the land resource–food price nexus of the Sustainable Development Goals, *Science Advances 2*, 9 (2016) http://dx.doi.org/10.1126/sciadv.1501499
- Newbold, T., *et al.* Has land use pushed terrestrial biodiversity beyond the planetary boundary? A global assessment. *Science* 353, 6296 (2016) http://dx.doi.org/10.1126/science.aaf2201
- VanVuuren *et al.*, Pathways to achieve a set of ambitious global sustainability objectives by 2050: Explorations using the IMAGE integrated assessment model, *Technological Forecasting and Social Change*, 98 (2015) https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.03.005
- Steffen *et al.*,Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet, *Science*,, 347, 6223 (2015) http://dx.doi.org/10.1126/science.1259855
- Stehfest, E. *et al.*, Climate benefits of changing diet, *Climatic Change*, 95 (2009) http://dx.doi.org/10.1007/s10584-008-9534-6

Publications de référence sur les modèles

Modèle NLU

- Brunelle, T., *et al.* Unravelling Land-Use Change Mechanisms at Global and Regional Scales. *Biophys Econ Resour Qual* 3, 13 (2018) https://doi.org/10.1007/s41247-018-0047-2
- Souty, F., *et al.* Modelling economic and biophysical drivers of agricultural land-use change. Calibration and evaluation of the Nexus Land-Use model over 1961–2006 . *Geosci. Model Dev. Discuss.*, 6 (2013) http://dx.doi.org/10.5194/gmdd-6-6975-2013

Modèle PREDICTS

- Newbold, T., *et al.* Has land use pushed terrestrial biodiversity beyond the planetary boundary? A global assessment. *Science* 353, 6296 (2016) http://dx.doi.org/10.1126/science.aaf2201
- Newbold, T., *et al.* Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. *Nature* 520 (2015) https://doi.org/10.1038/nature14324

ExanThèse #1 - CC BY 2.0 FR

Le numéro 1 de la collection

Ce numéro livre les principaux résultats de la thèse intitulée « Évaluation quantitative de la durabilité de stratégies d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur de l'agriculture, de la forêt et des autres usages des sols à l'échelle mondiale[1] ».
Préparée à l'université de **Paris Saclay** en partenariat avec le **CIRED** et l'**Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement (AgroParisTech)**, sous la direction de **Harold Levrel** et de **Patrice Dumas**, elle a été soutenue le **15 mai 2019**, au CIRED.
[Manuscrit - en anglais - disponible intégralement en ligne : https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02368885]

Rémi Prudhomme, chercheur au Cirad
prudhomm@centre-cired.fr

Le document présent est diffusé sous la licence **Creative Commons BY-NC-SA 4.0** (*Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Partage dans les Mêmes Conditions 4.0 International*).

Toutes **les illustrations** ont été réalisées par E. Carciofi, exceptée la photographie de la vache de la page 6 (domaine public). Elles **ne peuvent être utilisées sans autorisation** (carciofi@centre-cired.fr).

Comment citer ce document : Prudhomme R., Carciofi E., « Faut-il choisir entre différents objectifs du développement durable lorsque l'on réduit les émissions de gaz à effet de serre dans le secteur agricole et forestier ? », ExanThèse, n°1, juin 2020 (collection CIRED).

ExanThèse #1 - CC BY 2.0 FR