

Université de Montréal

Quantification des apports anthropiques en nutriments sur le territoire québécois pour
comprendre le risque de pollution des cours d'eau en azote et en phosphore

Par

Stéphanie Shousha et Roxane Maranger

Département de sciences biologiques, Université de Montréal

Groupe de recherche interuniversitaire en limnologie

Février 2024

Table des matières

Table des matières	2
Liste des tableaux	3
Liste des figures	4
Liste des sigles et abréviations	6
1. Introduction	7
2. Contexte	7
3. Méthodologie	8
4. Principaux résultats	11
5. Conclusion.....	12
6. Références	14
Annexe 1 : Schématisation des équations NANI-NAPI en anglais	15

Liste des tableaux

Tableau 1. –	Traduction des termes NANI-NAPI du français à l'anglais.....	16
--------------	--	----

Liste des figures

- Figure 1.** – Schéma hypothétique conceptuel de deux territoires donnés (panneaux a et b) ayant des recouvrement d'utilisation du territoire (en %) identiques (zones hachurées). L'intensité des activités dans le territoire b), qu'elles soient agricoles ou urbaines, est plus élevée que l'intensité des activités du territoire a), suggérant que le territoire b) est plus à risque de polluer les cours d'eau via un transfert plus important de nutriments de l'écosystème terrestre vers l'écosystème aquatique. Seulement une quantification de ces activités permettrait de découvrir ce patron.8
- Figure 2.** – Apports anthropiques net d'azote (NANI) calculés pour l'année 2021 à deux échelles spatiales différentes, soit au niveau du bassin versant de la Yamaska (a) et au niveau des municipalités de ce bassin versant (b). La carte au niveau de la municipalité réelle un patron considérablement plus hétérogène que celle du bassin versant, confirmant l'utilité de cette échelle pour l'identification de points de contrôle. NANI est rapporté en kg-N km^{-2}9
- Figure 3.** – Schéma conceptuel du fonctionnement de NANI ou NAPI : les citoyens se nourrissent (apports en N et P) et utilisent des détergents (apports en P), les activités agricoles incluent la fixation de N par certaines cultures, requièrent des fertilisants (apports en N et en P) et de la nourriture pour le bétail (apports en N et P). Le modèle inclut originalement la déposition atmosphérique en N, mais ce terme est en pâle car il n'est pas comptabilisé pour ce contrat. Les équations pour calculer NANI et NAPI sont décrites à droite. Le même schéma, cette fois-ci en anglais, se retrouve dans l'Annexe 1 afin d'aider à faire le lien avec les termes retrouvés dans la littérature scientifique. Les composantes individuelles de la méthode sont aussi détaillées dans l'Annexe 1, toujours en anglais.11
- Figure 4.** – Trois composantes individuelles de NANI calculées pour 2021 pour les 91 municipalités du bassin versant de la Yamaska (la même chose pourrait être effectuée pour NAPI). Dans ce bassin versant, le N apporté sur le territoire pour subvenir aux besoins agricoles (combinant l'agriculture de cultures et d'élevage) est $\sim 30x$ plus élevé que le N apporté sur le territoire pour soutenir la population humaine.12
- Figure 5.** – Schéma visualisant les équations NANI-NAPI. La déposition atmosphérique est en pâle car c'est le terme de NANI qui n'est pas comptabilisé pour ce contrat.17

Figure 6. – La demande humaine (human demand) se calcule en multipliant le nombre d’humains par municipalité (nombre trouvé dans les recensements de population) par 1) la consommation annuelle de protéine par personne et 2) le contenu en N et en P par protéine. Le résultat donne des kilogrammes de N et P que les humains dans une municipalité requièrent pour vivre par année.	18
Figure 7. – Le rendement en culture est calculé à partir d’hectares de cultures rapportés dans les recensements agricoles, multiplié par 1) les rendements (en kg/hectares, certains varient historiquement, d’autres spatialement, tout dépend du type de culture), 2) par le contenu en N et en P par kg de rendement, et 3) par la portion qui est acheminée aux humains et/ou au bétail, tout en prenant compte qu’une fraction est perdue lors de la récolte.....	19
Figure 8. – Les produits animaliers sont issus des abattages, de la production laitière et des œufs. L’abattage est calculé selon le nombre de tête de bétail par municipalité multiplié par 1) la proportion du nombre de bétail abattu au niveau du pays (meilleure donnée disponible), 2) le poids de ces carcasses, 3) la portion comestible de ces carcasses, et 4) le contenu en N ou en P de ces portions comestibles. Pour la production laitière, le nombre de vaches laitières est multiplié par 1) la quantité (kg) de lait produite par animal et 2) le contenu en N ou en P du lait. La production d’œufs est calculée par le nombre de poules pondeuses multiplié par 1) le nombre d’œuf par poule, 2) le poids des œufs, 3) la portion comestible des œufs, et 4) le contenu en N et en P de la portion comestible.	20
Figure 9. – La demande animale (dynamic animal intake) se calcule en multipliant le nombre de bétail par municipalité (trouvés dans les recensements agricoles) par 1) le temps passé par ces animaux sur la ferme et 2) le taux de consommation de N ou de P.	21
Figure 10. – Les fertilisants sont calculés selon l’argent dépensé pour acheter les fertilisants par municipalité (colonne du recensement agricole), ainsi qu’une règle de trois entre l’argent dépensé au niveau provincial et l’application en kg-N et P au provincial, car les données d’application au niveau municipal n’ont pas été trouvées (ou n’existent pas ouvertement).....	22
Figure 11. – La fixation biologique de l’azote est calculée selon les hectares de quatre cultures (luzerne, fourrage, soja, pâturage) multipliés par les taux de fixation de N.	23

Liste des sigles et abréviations

Kg : kilogramme

Km : kilomètre

MELCCFP : Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs

N : azote

NANI : Net anthropogenic nitrogen inputs

NAPI: Net anthropogenic phosphorus inputs

P : phosphore

1. Introduction

La dégradation de la qualité de l'eau est le plus souvent causée par un transfert de nutriments en excès provenant de diverses activités humaines sur le territoire jusqu'aux cours d'eau récepteurs. Un apport potentiellement excessif des nutriments comme l'azote (N) et le phosphore (P) peut entraîner l'eutrophisation des écosystèmes aquatiques, menant à des conditions très graves comme la prolifération d'algues toxiques ou une perte d'oxygène dans le milieu, influençant différents services écosystémiques telle qu'une perte d'habitats de poisson et d'eau potable.

Le transfert du N et du P peut provenir de sources ponctuelles, telles que les effluents des stations d'épuration des eaux usées dans les zones urbanisées, ou de sources diffuses qui s'écoulent par le ruissellement, telles que celles des fosses septiques dans les zones rurales ou de l'épandage d'engrais ou de fumier sur le territoire, par exemple. En effet, la croissance démographique et la demande accrue en matière de production alimentaire, y compris la consommation de viande, exercent des pressions de plus en plus fortes sur les cours d'eaux récepteurs. Connaître précisément la quantité, le type et l'origine de ces apports excessifs de nutriments est donc la première étape nécessaire pour élaborer des stratégies d'atténuation appropriées en vue d'assurer la viabilité à long terme des eaux douces et des ressources aquatiques, ce qui est l'objet de la méthodologie présentée dans ce rapport.

2. Contexte

Même si les cartes actuelles d'utilisation du territoire nous permettent d'identifier la position géographique des différentes activités humaines de façon générale, elles ne quantifient pas le N et le P que l'urbanisation et l'agriculture apportent sur un territoire pour se soutenir. Quantifier l'intensité de ces activités nécessite donc une méthodologie quantitative plus précise qui permettra une meilleure compréhension du risque d'une région sur le territoire à polluer les cours d'eau. Par exemple, un recouvrement de territoire identique dans deux régions différentes (Fig. 1, scénario hypothétique) pourrait masquer la différence entre leurs pratiques agricoles. De façon générale, des pratiques plus intenses (en termes de cultures ou type d'élevage) ou une densification animale plus

importante engendrent des apports nutritifs au territoire plus élevés, entraînant par la suite un ruissellement plus important de N et P vers l'eau.

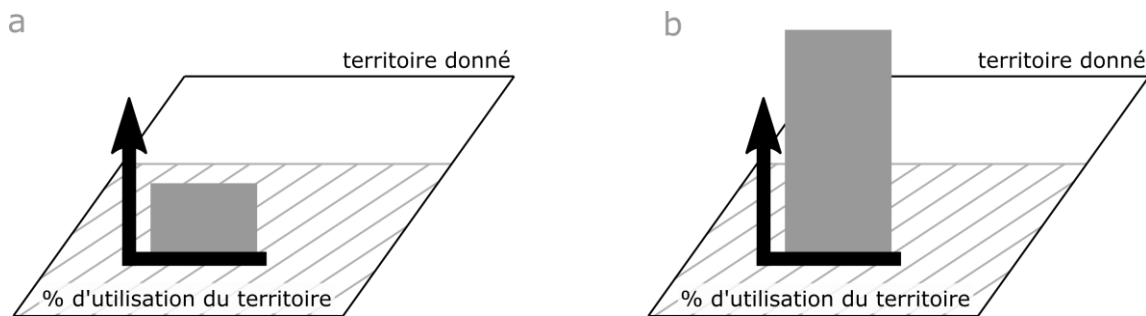


Figure 1. – Schéma hypothétique conceptuel de deux territoires donnés (panneaux a et b) ayant des recouvrement d'utilisation du territoire (en %) identiques (zones hachurées). L'intensité des activités dans le territoire b), qu'elles soient agricoles ou urbaines, est plus élevée que l'intensité des activités du territoire a), suggérant que le territoire b) est plus à risque de polluer les cours d'eau via un transfert plus important de nutriments de l'écosystème terrestre vers l'écosystème aquatique. Seulement une quantification de ces activités permettrait de découvrir ce patron.

La quantification précise des activités humaines permet aussi de distinguer entre les sources d'apports au territoire : les apports sont-ils majoritairement dus à l'urbanisation, l'agriculture de cultures ou l'agriculture d'élevage ? Identifier, et quantifier, la source dominante de ces apports permet donc de comprendre à quoi, et de quelle magnitude, est due la pollution du N et P dans les cours d'eau. Ces informations identifient ce qu'on appelle des « points de contrôle », soit les régions sur le territoire qui risquent de livrer plus d'éléments nutritifs vers les cours d'eau. Ces informations sont donc aussi indispensables pour élaborer des stratégies d'intervention qui réduiront la pollution de N et de P dans les cours d'eau du Québec, et ainsi améliorer la qualité de l'eau et la viabilité des services écosystémiques à une échelle régionale.

3. Méthodologie

L'approche du bilan de masse « Net Anthropogenic Nitrogen/Phosphorus Inputs », soit « NANI-NAPI » permet justement de quantifier les apports en nutriments qu'ont besoin les humains pour

soutenir leurs activités sur le territoire. Depuis 25 ans, NANI-NAPI est utilisé avec succès à travers le monde pour quantifier les nutriments importés sur un territoire, ainsi que la fraction de ces nutriments qui se rend aux cours d'eau et les pollue (Goyette et al., 2016; Hong et al., 2012; Howarth et al., 1996; Swaney et al., 2015). Par contre, jusqu'à présent, la méthode est utilisée sur des bassins versants de grande taille, ce qui ne permet pas d'identifier précisément les points de contrôle des sources de nutriments (Fig. 2a, utilisant le bassin versant de la Yamaska à titre d'exemple). Ici, Shousha et Maranger présentent les apports en N et en P sur le territoire québécois à l'échelle de données la plus précise disponible, soit celle de la municipalité (Fig. 2b), pour quelques centaines de municipalités du Québec. Cette échelle permet l'identification de points de contrôle pour informer les différents praticiens où intervenir sur le territoire afin de diminuer l'apport des nutriments aux cours d'eau et assurer la durabilité de ces écosystèmes.

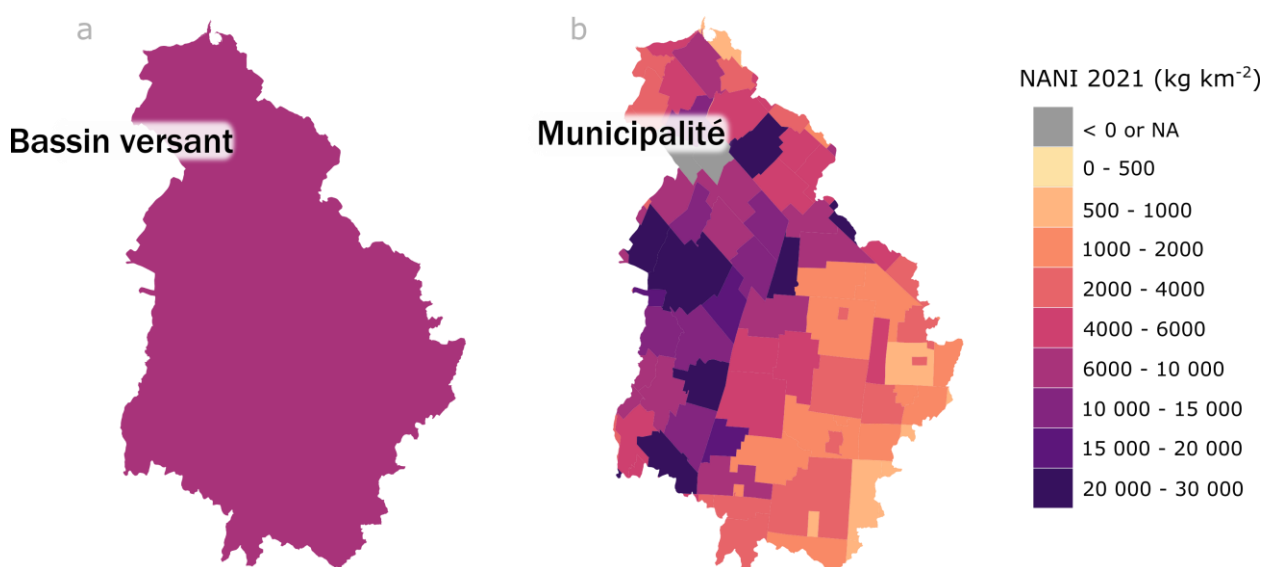


Figure 2. – Apports anthropiques net d’azote (NANI) calculés pour l’année 2021 à deux échelles spatiales différentes, soit au niveau du bassin versant de la Yamaska (a) et au niveau des municipalités de ce bassin versant (b). La carte au niveau de la municipalité révèle un patron considérablement plus hétérogène que celle du bassin versant, confirmant l’utilité de cette échelle pour l’identification de points de contrôle. NANI est rapporté en kg-N km^{-2} .

Les données proviennent de plusieurs sources, dont Statistique Canada et la littérature scientifique. L’approche est amplement détaillée dans Shousha et al. (2023) et schématisé à la Fig. 3. La

méthode se base sur la prémisse qu'une région (ou municipalité) reçoit du N et du P de plusieurs sources différentes, soit l'urbanisation, différentes pratiques agricoles, et la déposition atmosphérique. La déposition atmosphérique ne pouvant pas être contrôlée facilement de façon locale, nous l'avons exclue du bilan de masse. Les autres catégories qui forment NANI ou NAPI incluent plus spécifiquement la fixation biologique du N par certaines cultures, les fertilisants synthétiques, les détergents à lessive et à vaisselle utilisés par la population humaine, la nourriture requise par municipalité pour soutenir sa population humaine et la nourriture requise pour soutenir le bétail, si lieux est. Les composantes qui représentent la consommation par les humains et par les animaux prennent implicitement en compte leurs rejets organiques. Pour simplifier la réalité, où la majorité des produits animaliers et des rendements en cultures sont exportés à des marchés nationaux ou internationaux et où la majorité de la nourriture nécessaire pour les populations humaines et animales est réimportée, la méthode prend directement la balance entre ces deux composantes. Cette balance est représentée par les équations :

Alimentation humaine = Demande humaine – Produits animaliers – Portion du rendement des cultures acheminée aux humains,

Alimentation bétail = Demande animale – Portion du rendement des cultures acheminée au bétail,

où il est donc supposé que les produits animaliers d'une municipalité et/ou ses rendements en culture vont d'abord nourrir sa population humaine (et son bétail). L'excès, si lieux est, sera exporté et le terme « alimentation humaine » (ou « alimentation bétail ») sera négatif.

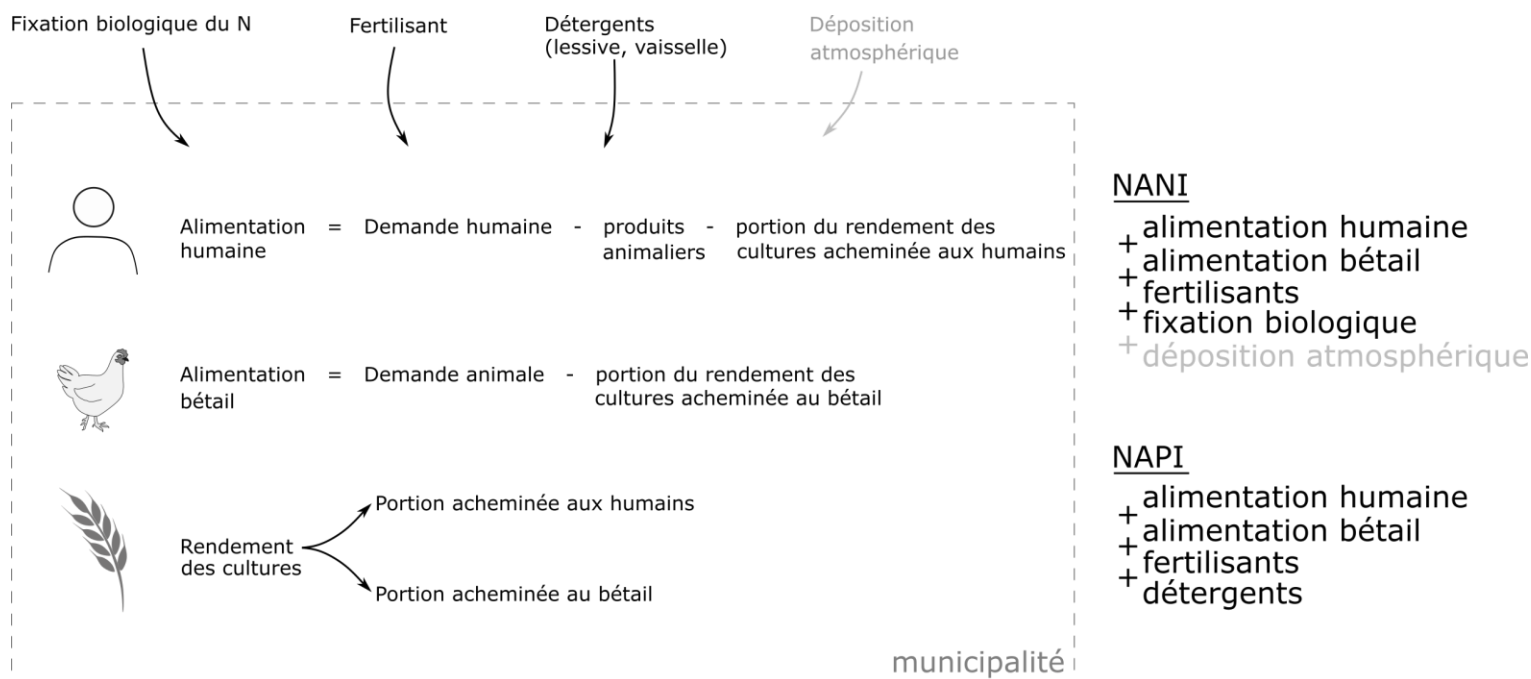


Figure 3. – Schéma conceptuel du fonctionnement de NANI ou NAPI : les citoyens se nourrissent (apports en N et P) et utilisent des détergents (apports en P), les activités agricoles incluent la fixation de N par certaines cultures, requièrent des fertilisants (apports en N et en P) et de la nourriture pour le bétail (apports en N et P). Le modèle inclut originalement la déposition atmosphérique en N, mais ce terme est en pâle car il n’est pas comptabilisé pour ce contrat. Les équations pour calculer NANI et NAPI sont décrites à droite. Le même schéma, cette fois-ci en anglais, se retrouve dans l’Annexe 1 afin d’aider à faire le lien avec les termes retrouvés dans la littérature scientifique. Les composantes individuelles de la méthode sont aussi détaillées dans l’Annexe 1, toujours en anglais.

4. Principaux résultats

Les résultats du bilan de masse sont rapportés en kilogramme de N ou P, puis divisés par l’aire de surface de chaque municipalité afin de comparer des régions ayant des surfaces différentes. Les données sont donc en kg-N km⁻² ou kg-P km⁻². Plus les kg-N km⁻² ou kg-P km⁻² sont élevés dans une municipalité, plus cette municipalité serait à prioriser en termes d’interventions sur le territoire pour diminuer les apports nutritifs aux cours d’eau. Cette diminution sera le plus efficace si la stratégie d’intervention concorde avec la source dominante des apports au territoire. Puisque

NANI-NAPI permet de distinguer entre les types d'apports (urbain vs cultures vs bétail), différentes cartes sont disponibles pour montrer la source principale des apports en N et en P au territoire. Autant la composante « Demande humaine » est un bon proxy pour démontrer l'intensité de la densification humaine sur le territoire (Fig. 4a), la composante « Fertilisants » en est un bon pour l'intensité de l'agriculture de cultures (Fig. 4b) et la composante « Demande animale » en est un bon pour l'intensité de l'agriculture d'élevage (Fig. 4c).

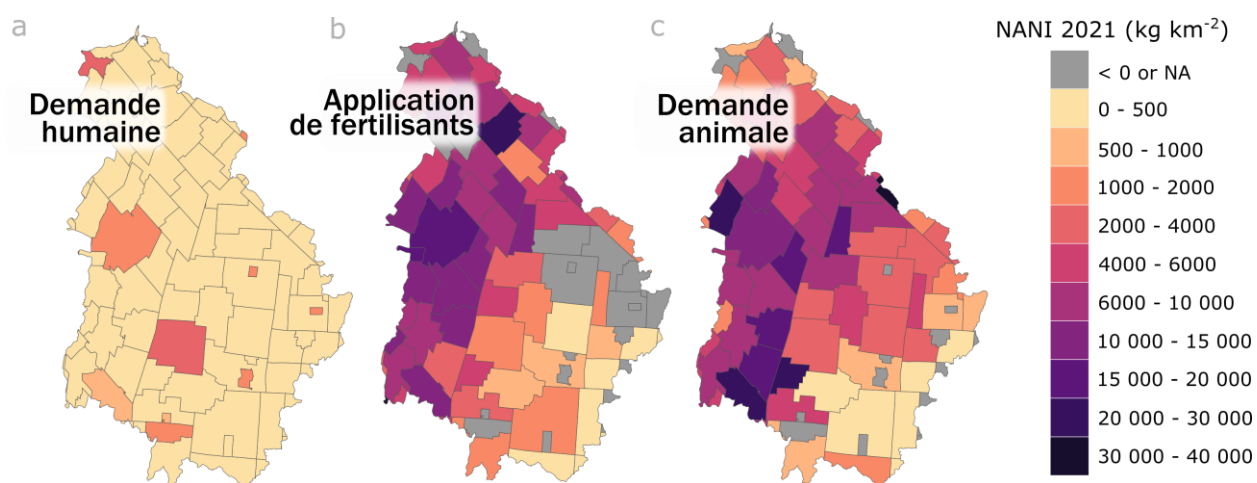


Figure 4. – Trois composantes individuelles de NANI calculées pour 2021 pour les 91 municipalités du bassin versant de la Yamaska (la même chose pourrait être effectuée pour NAPI). Dans ce bassin versant, le N apporté sur le territoire pour subvenir aux besoins agricoles (combinant l'agriculture de cultures et d'élevage) est ~30x plus élevé que le N apporté sur le territoire pour soutenir la population humaine.

5. Conclusion

La méthode NANI-NAPI est reconnue globalement pour lier les apports anthropiques de nutriments apportés sur le territoire aux concentrations retrouvées dans les écosystèmes aquatiques. L'application de cette méthode à l'échelle spatiale la plus fine possible, telle que détaillée dans Shousha et al. (2023), permet pour la première fois une compréhension quantitative des pressions urbaines et agricoles sur le territoire québécois. Non seulement la méthode identifie les points de contrôle sur le territoire (c.-à-d., les municipalités ayant des très forts apports), elle distingue entre

la source dominante des apports (urbain vs culture vs bétail), permettant de savoir où et comment intervenir afin d'assurer une gestion durable des ressources aquatiques québécoises. Bref, NANI-NAPI est un outil clair, qui apporte une information quantitative et pratique à utiliser, essentielle pour mieux comprendre les enjeux liés à l'eutrophisation et la viabilité des cours d'eau. L'approche est bas e sur les meilleures donn es disponibles et est simple à communiquer, permettant de travailler ensemble pour trouver des solutions pertinentes.

6. Références

- Goyette, J.-O., Bennett, E. M., Howarth, R. W., & Maranger, R. (2016). Changes in anthropogenic nitrogen and phosphorus inputs to the St. Lawrence sub-basin over 110 years and impacts on riverine export. *Global Biogeochemical Cycles*, 30, 1000–1014. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.13280>
- Hong, B., Swaney, D. P., Mörrth, C. M., Smedberg, E., Eriksson Hägg, H., Humborg, C., Howarth, R. W., & Bouraoui, F. (2012). Evaluating regional variation of net anthropogenic nitrogen and phosphorus inputs (NANI/NAPI), major drivers, nutrient retention pattern and management implications in the multinational areas of Baltic Sea basin. *Ecological Modelling*, 227, 117–135. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.12.002>
- Howarth, R. W., Billen, G., Swaney, D., Townsend, A., Jaworski, N., Lajtha, K., Downing, J. A., Elmgren, R., Caraco, N., Jordan, T., Berendse, F., Freney, J., Kudryakov, V., Murdoch, P., & Zhu, Z. L. (1996). Regional nitrogen budgets and riverine N & P fluxes for the drainages to the North Atlantic Ocean: Natural and human influences. *Biogeochemistry*, 35(1), 75–139. <https://doi.org/10.1007/BF02179825>
- Shousha, S., Maranger, R., & Lapierre, J.-F. (2023). Decadal Changes in Anthropogenic Inputs and Precipitation Influence Riverine Exports of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus, and Alter Ecosystem Level Stoichiometry. *Global Biogeochemical Cycles*.
- Swaney, D. P., Hong, B., Paneer Selvam, A., Howarth, R. W., Ramesh, R., & Purvaja, R. (2015). Net anthropogenic nitrogen inputs and nitrogen fluxes from Indian watersheds: An initial assessment. *Journal of Marine Systems*, 141, 45–58. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2014.09.004>

Annexe 1 : Schématisation des équations NANI-NAPI en anglais

Rappelons que les équations du bilan de masse sont les suivantes :

$\text{NANI} = \text{Food} + \text{Feed} + \text{Fertiliser} + \text{Biological N fixation} + \text{Atmospheric N deposition}$

$\text{NAPI} = \text{Food} + \text{Feed} + \text{Fertiliser} + \text{Detergents}$

$\text{Food} = \text{Human demand} - \text{Crop yield (to humans)} - \text{Animal product}$

$\text{Feed} = \text{Animal demand (or Dynamic animal intake)} - \text{Crop yield (to animals)}$

Les unités de chaque composante sont en kilogramme-N (ou P) km^{-2} par année.

Le terme en pâle, soit la déposition atmosphérique, n'est pas comptabilisé dans les données remises au MELCCFP.

Les termes anglophones employés dans la littérature scientifique sont les suivants :

Tableau 1. – Traduction des termes NANI-NAPI du français à l’anglais

Français	Anglais
Apports anthropiques net d’azote	Net Anthropogenic Nitrogen Inputs (NANI)
Apports anthropiques net de phosphore	Net Anthropogenic Phosphorus Inputs (NAPI)
Nourriture qui est consacrée à la consommation par les humains	Food
Nourriture qui est consacrée à la consommation par le bétail	Feed
Fertilisant	Fertiliser
Fixation biologique de l’azote	Biological N fixation
Déposition atmosphérique de l’azote*	Atmospheric N deposition*
Détergent à lessive	Laundry detergent
Détergent à vaisselle	Dishwasher detergent
Demande humaine (en termes de contenu en N ou en P dans les protéines requises)	Human demand
Produits animaliers (provenant des abattages)	Animal product
Portion du rendement en cultures qui est acheminée pour la consommation par les humains	Crop yield (to humans)
Demande animale (en termes de contenu en N ou en P dans le fourrage)	Animal intake
Portion du rendement en cultures qui est acheminée pour la consommation par le bétail	Crop yield (to livestock)

*Ce terme est en pâle car il n’est pas comptabilisé pour ce contrat.

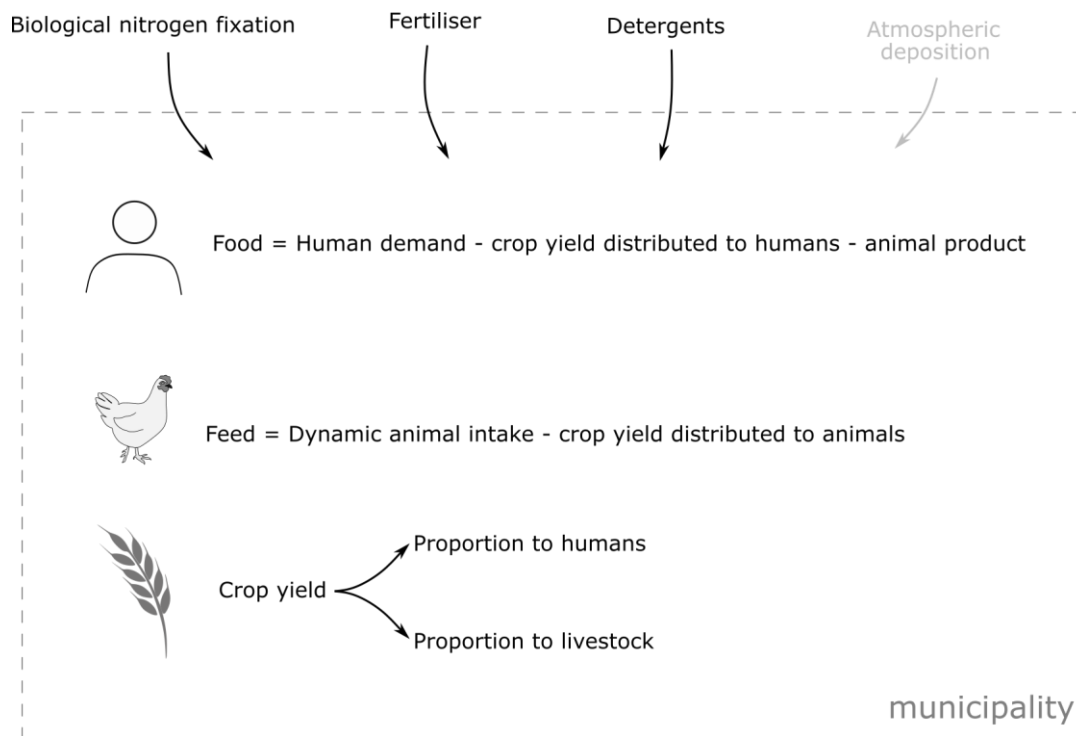


Figure 5. – Schéma visualisant les équations NANI-NAPI. La déposition atmosphérique est en pâle car c'est le terme de NANI qui n'est pas comptabilisé pour ce contrat.

Les figures suivantes détaillent comment les composantes individuelles de NANI-NAPI sont calculées à partir des données de Statistiques Canada et de la littérature scientifique. Pour voir la source exacte de ces données, référez-vous aux informations supplémentaires de l'article Shousha et al. (2023). Notez que la déposition atmosphérique n'est pas décrite ici, mais qu'elle l'est dans Shousha et al. (2023). Notez aussi que les coefficients (« coeff. »), tout comme les données des recensements agricoles et de population (« census »), sont des données qui varient par année. Dans les prochaines figures, certains termes sont en pâle afin de mettre en valeur les termes explicités dans chaque schéma (en foncé). Par exemple, à la Fig. 6, les termes *Food*, *crop yield distributed to humans*, et *animal product* sont en pâle pour mettre en valeur le terme *Human demand* qui est celui explicité dans ce schéma.

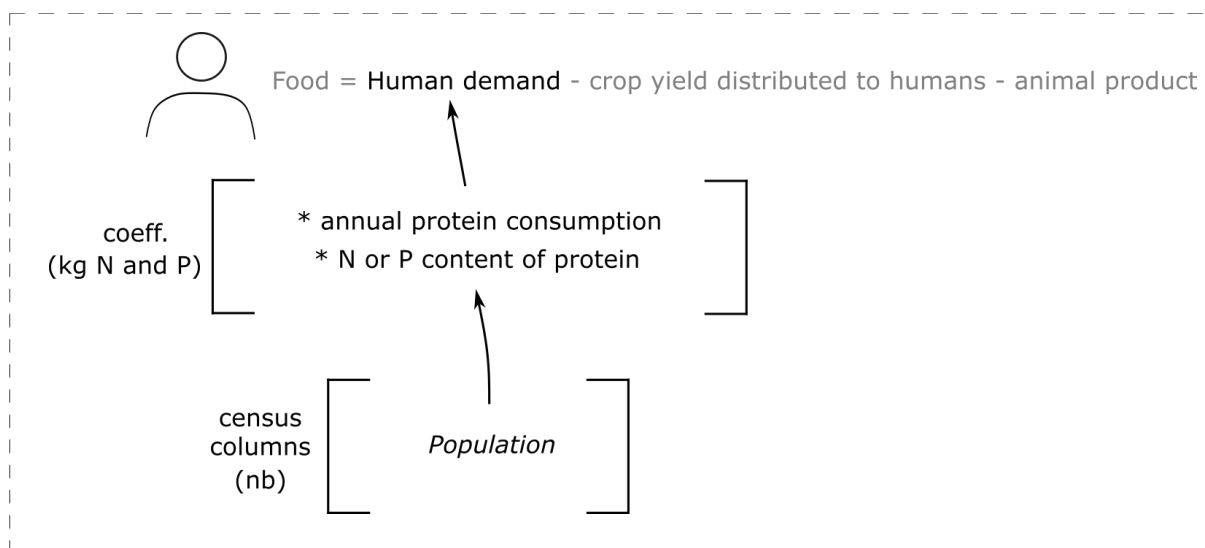


Figure 6. – La demande humaine (human demand) se calcule en multipliant le nombre d'humains par municipalité (nombre trouvé dans les recensements de population) par 1) la consommation annuelle de protéine par personne et 2) le contenu en N et en P par protéine. Le résultat donne des kilogrammes de N et P que les humains dans une municipalité requièrent pour vivre par année.

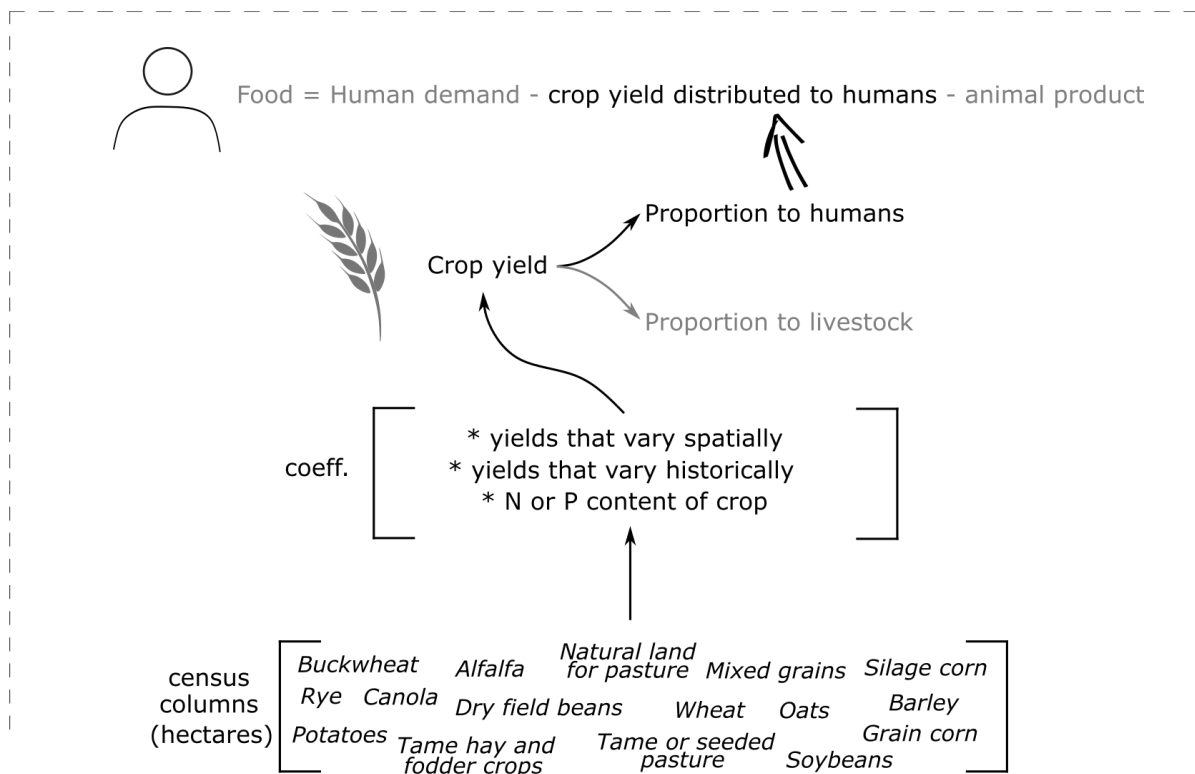


Figure 7. – Le rendement en culture est calculé à partir d’hectares de cultures rapportés dans les recensements agricoles, multiplié par 1) les rendements (en kg/hectares, certains varient historiquement, d’autres spatialement, tout dépend du type de culture), 2) par le contenu en N et en P par kg de rendement, et 3) par la portion qui est acheminée aux humains et/ou au bétail, tout en prenant compte qu’une fraction est perdue lors de la récolte.

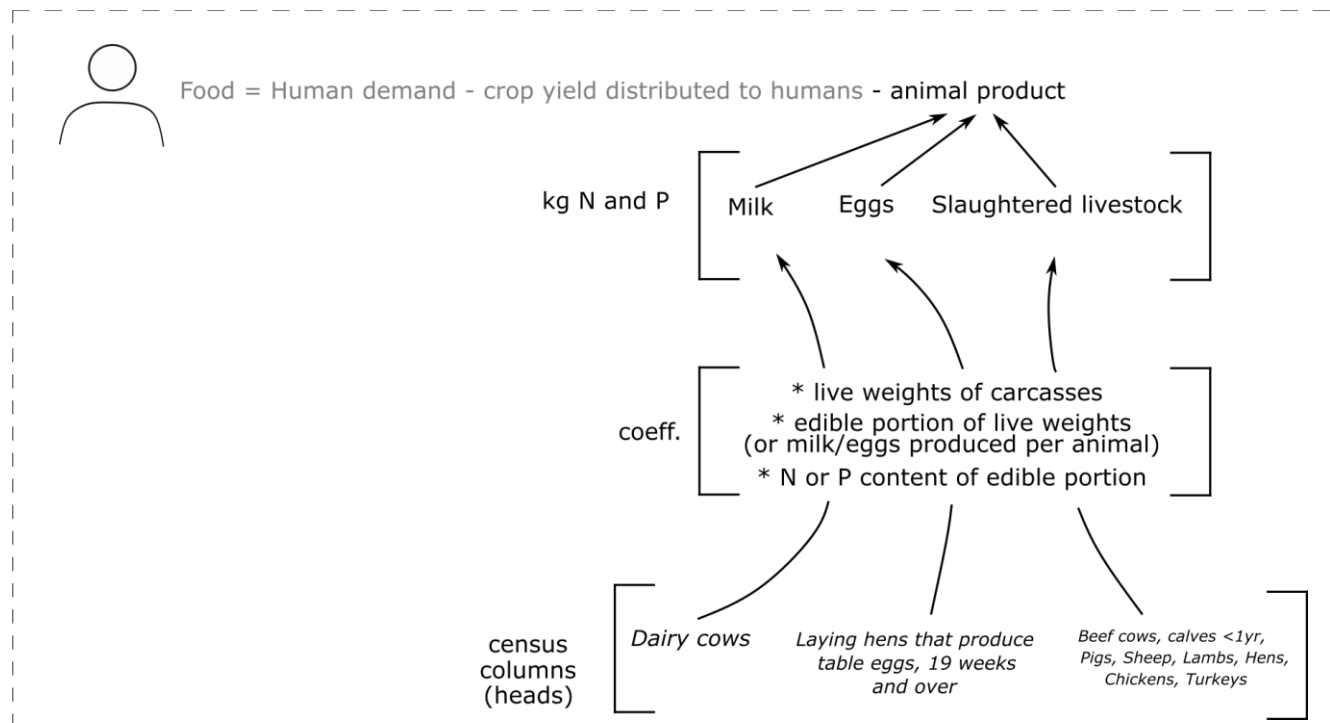


Figure 8. – Les produits animaliers sont issus des abattages, de la production laitière et des œufs.

L'abattage est calculé selon le nombre de tête de bétail par municipalité multiplié par 1) la proportion du nombre de bétail abattu au niveau du pays (meilleure donnée disponible), 2) le poids de ces carcasses, 3) la portion comestible de ces carcasses, et 4) le contenu en N ou en P de ces portions comestibles. Pour la production laitière, le nombre de vaches laitières est multiplié par 1) la quantité (kg) de lait produite par animal et 2) le contenu en N ou en P du lait. La production d'œufs est calculée par le nombre de poules pondeuses multiplié par 1) le nombre d'œuf par poule, 2) le poids des œufs, 3) la portion comestible des œufs, et 4) le contenu en N et en P de la portion comestible.

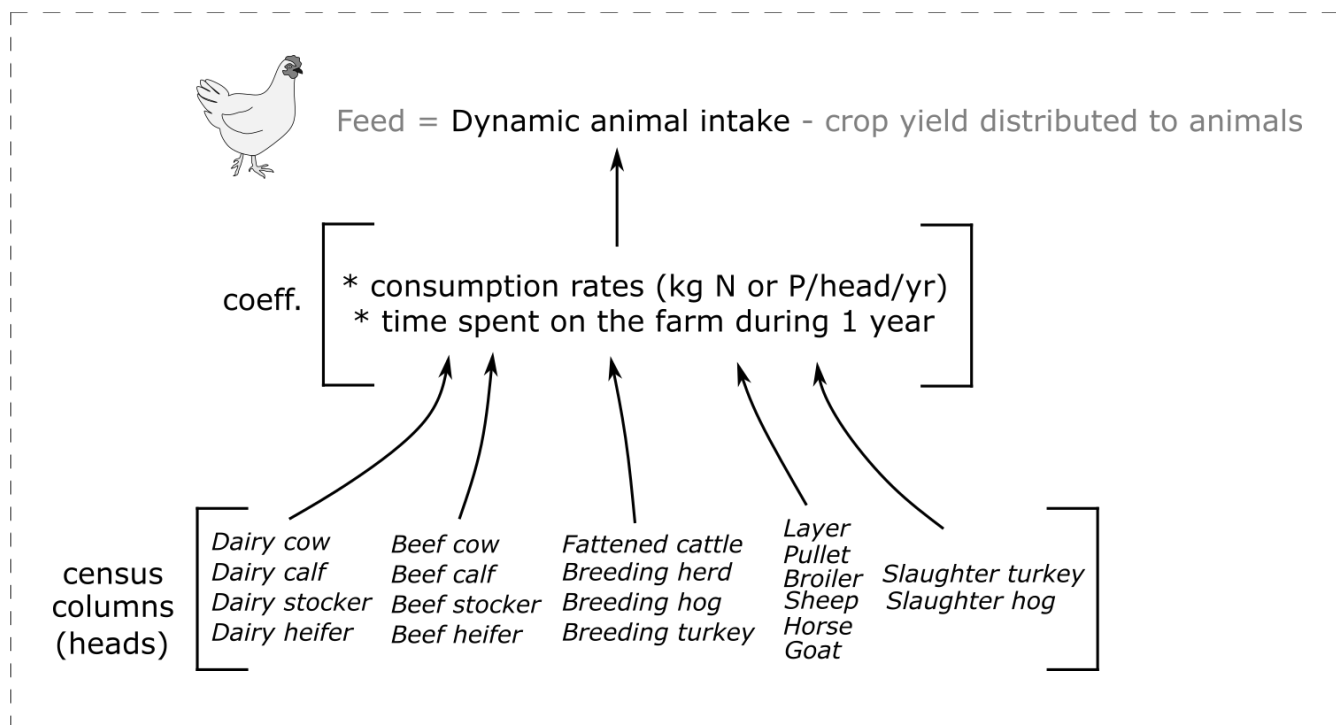


Figure 9. – La demande animale (dynamic animal intake) se calcule en multipliant le nombre de bétail par municipalité (trouvés dans les recensements agricoles) par 1) le temps passé par ces animaux sur la ferme et 2) le taux de consommation de N ou de P.

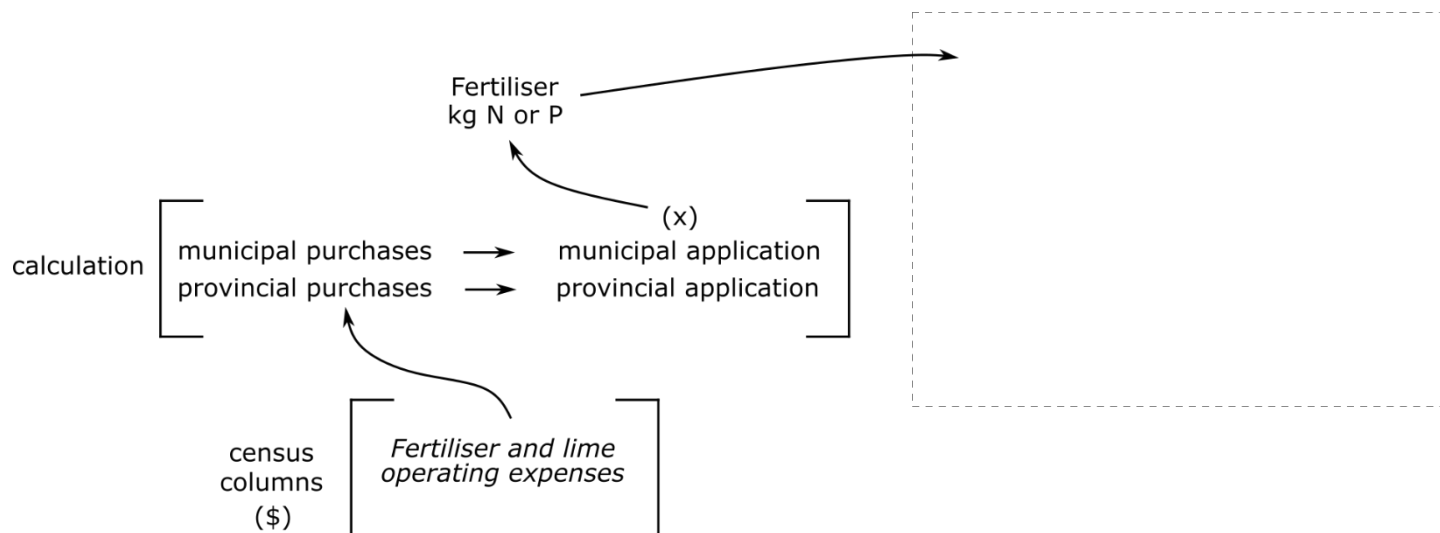


Figure 10. – Les fertilisants sont calculés selon l’argent dépensé pour acheter les fertilisants par municipalité (colonne du recensement agricole), ainsi qu’une règle de trois entre l’argent dépensé au niveau provincial et l’application en kg-N et P au provincial, car les données d’application au niveau municipal n’ont pas été trouvées (ou n’existent pas ouvertement).

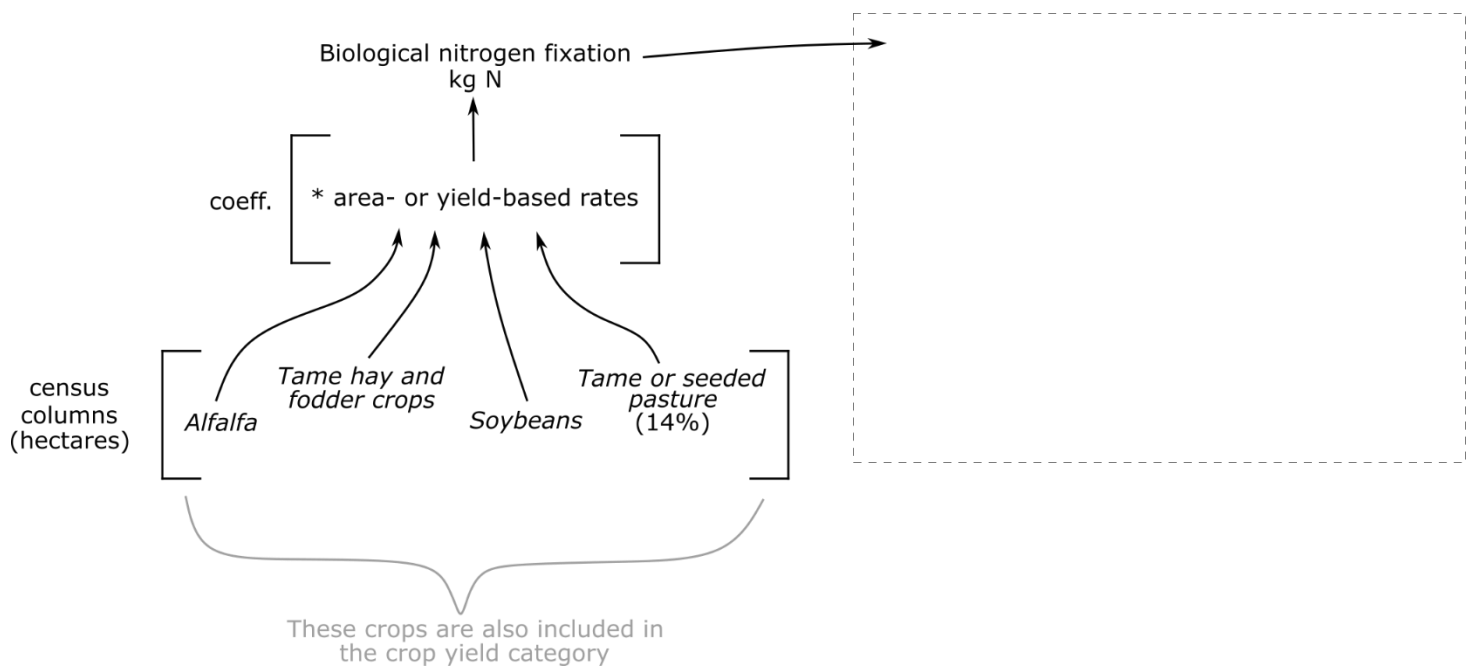


Figure 11. – La fixation biologique de l’azote est calculée selon les hectares de quatre cultures (luzerne, fourrage, soja, pâturage) multipliés par les taux de fixation de N.