

Calculer l’empreinte écologique, du global au local *

Julien Alapetite †

25 février 2010

Résumé

Une quinzaine d’années après sa création, l’empreinte écologique est devenu un indicateur de développement durable très populaire. Le calcul de l’empreinte à l’échelle des nations est complètement opérationnel, et peut être réalisé annuellement de manière robuste et comparable pour 150 pays. Les résultats de ces calculs servent eux-même de données de base pour calculer l’empreinte écologique à des échelles plus fines : régions, villes, entreprises et individus. Cependant il n’existe pas aujourd’hui de méthodologies standardisées pour mener les calculs à ces échelles. Des difficultés surgissent dès que l’on cherche à formuler ce qu’on veut calculer localement. Une des raisons provient d’un certain flou au niveau des concepts de base, ce qui nécessite de les réexaminer et de mieux les formaliser.

Il existe aujourd’hui de nombreuses présentations de la méthode de calcul de l’empreinte. Cependant, celles-ci sont soit présentées sous une forme vulgarisée et imagée, soit sous forme de mode d’emploi avec les formules finales, sans véritables justifications approfondies de celles-ci et n’indiquant pas les pistes d’améliorations. Depuis quelques années des articles essaient de remédier à cela et tendent à formuler plus rigoureusement et sous une forme scientifique les calculs de l’empreinte. C’est ce que nous reprenons ici, présentant pas à pas sur des modèles simples très stylisés, de manière rigoureuse et pédagogique, les différents paramètres et étapes du calculs.

Nous commençons par les notions principales de biocapacité et d’empreinte écologique ainsi que le dépassement écologique. Ensuite, sont présentées les notions d’hectare global et réel ainsi que les paramètres qui permettent de passer de l’un à l’autre, facteurs de récolte et facteurs d’équivalence. Puis nous présentons le calcul pour les produits secondaires et introduisons les coefficients d’efficience. Un formalisme mathématique des calculs est présenté. Nous présentons ensuite les méthodes de calculs plus avancées basées sur les analyses entrées-sorties (input-output analysis) qui permettent d’attribuer finement les empreintes aux différentes catégories de consommation, rendant ainsi possible les calculs d’empreinte à des échelles plus fines que le territoire national.

Selon cette présentation très stylisée, l’empreinte écologique est une mesure réelle de la pression anthropique sur l’environnement. Nous ignorons ainsi les considérations sur la pertinence de cette mesure, ainsi que les aspects statistiques du calcul. Le calcul de l’empreinte est présenté ainsi de manière strictement formel. Par ailleurs, cette approche par la modélisation prépare le terrain pour une étude dynamique et prospective avec l’empreinte écologique.

*Document de travail

†Docteurant au CERAG(Centre d’Etudes et de Recherches Appliquées à la Gestion) de l’université Pierre Mendès France de Grenoble sous la direction de Denis Dupré

1 Introduction

L’empreinte écologique telle qu’elle a été introduite par Wackernagel and Rees [1996], quantifie la demande humaine sur la bioproduktivité en estimant la quantité de terre et de mer biologiquement productive nécessaire pour maintenir la consommation d’une population humaine donnée. Par cette définition, elle est d’un certain point de vue une mesure de la pression anthropique sur l’environnement. Dans ce cadre, celle-ci n’est mesurée qu’à travers les processus liés directement ou indirectement à la photosynthèse. Elle ignore ainsi délibérément de nombreux aspects notamment les substances toxiques rejetées dans la nature. Ce choix est évidemment structurant et conditionne largement les interprétations que l’on peut faire par l’analyse d’empreintes. Nous ignorons délibérément ici la question de sa pertinence comme indicateur de développement durable et construisons nos modèles de telle sorte que la pression anthropique soit effectivement directement mesurée par l’empreinte.

Le calcul de l’empreinte part de la consommation de ressources exprimée en unités de consommation (qui peuvent être des unités de masse pour les biens matériels, unités énergétiques pour l’énergie, unités monétaires pour les services) et les transforme en une mesure d’appropriation de surface terrestre et aquatique bioproduktivité, exprimée en hectare global. Les calculs d’empreinte peuvent être mondiaux, nationaux ou sous-nationaux et sont cohérents entre les différentes échelles.

Il est cependant notoire que le calcul de l’empreinte écologique dans la pratique bute sur un manque de disponibilité des données, de compatibilités entre elles impliquant de faire des hypothèses drastiquement simplificatrices pour certaines étapes du calcul. Cependant ces hypothèses sont souvent implicites sans que l’on ait bien conscience de ce qui est simplifié. Ainsi il manque une description de la méthode qui serait utilisée si toutes les données souhaitées étaient disponibles. Le problème n’est ainsi pas dans l’approximation inévitable, mais le fait qu’il n’est pas clair ce qui est approximé.

Il y a plusieurs conséquences : d’une part cela n’aide pas à une compréhension fine des calculs et introduit une certaine confusion quand les formules simplifiées sont présentées comme si elles étaient là sous leur forme naturelle ou exacte. D’autre part, ces confusions peuvent être sources d’incohérences qui subsistent même dans les calculs de l’empreinte sous sa forme standardisée¹. Enfin cette confusion devient un facteur complètement limitant quand il s’agit d’avancer vers des applications plus avancées du calcul d’empreinte notamment à l’échelle locale. Ainsi on s’aperçoit que pour les études faites à des échelles fines, la formulation même des questions qui se posent sur l’empreinte est confuse et entraîne tout un panel de méthodes utilisées au prix d’une grande incohérence entre celles-ci rendant les comparaisons entre diverses études complètement illusoires (voir par exemple Lewan and Simmons [2001] pour une revue de la diversité des approches en Europe). Au final on a l’impression qu’il ne reste de commun que la métaphore de l’empreinte et un lien avec les calculs nationaux standardisés, mais sans définition précise et formelle de l’empreinte à l’échelle locale.

Comme souvent, les progrès de la recherche se font en revisitant les concepts clés pour les rendre plus rigoureux et les redéfinir plus précisément, permettant de formuler les questions que l’on se pose de manière plus précise. C’est pourquoi la communauté de recherche de l’empreinte a besoin d’un travail théorique en dehors des considérations contingentes aux données. Ce besoin est reconnu par la communauté de chercheurs sur l’empreinte (Kitzes and Wackernagel [2009] ou Kitzes and al. [2009]) et certains articles adressent de front ce besoin d’une reprise

1. Voir Wiedmann and Lenzen [2006] pour une exposition détaillée de ces incohérences

un peu systématique et formel des concepts de l’empreinte notamment sur les différentes unités d’hectare, globaux, mondiaux, locaux (Galli et al. [2007]). De plus l’utilisation de plus en plus répandue et reconnue comme nécessaire du cadre d’analyse d’entrée-sortie oblige à reformuler les calculs dans ce cadre (Turner et al. [2006] et Wiedmann and Lenzen [2006]). Cependant il n’existe pas encore de notations ou de présentations homogènes et le passage d’un article à l’autre avec des conventions différentes rend difficile la lecture. C’est en partie l’objectif de cet article que de reprendre les éléments des différents articles cités et de les présenter sous une autre forme plus homogène et progressive. Notamment les calculs sont d’abord réalisés manuellement dans des tableaux à double entrée avant de le faire par calcul matriciel constitutif du cadre entrée-sortie. De plus nous cherchons à démontrer comment les calculs locaux sont un aboutissement de calculs de plus en plus raffinés de l’empreinte.

2 Biocapacité, empreinte écologique et dépassement écologique

Pour présenter ces trois notions nous partirons d’un modèle simple.

Considérons un territoire de 100 hectares constitué exclusivement de terres arables produisant une seule culture, le blé, avec une productivité du sol homogène de 10 tonnes de blé/hectare/an. La population est de 1000 personnes. Sur ces 100 hectares, 10 hectares sont réservés au village. L’unique consommation pour chaque habitant est de 450kg de blé par an. Calculons la biocapacité et l’empreinte sur ce territoire.

2.1 Biocapacité

La **biocapacité** est calculée dans le tableau 1. Elle désigne la production potentielle maximale de blé, mais au lieu de l’exprimer en tonne, elle est exprimée en hectare. Ainsi la production potentielle est de 1000 tonnes ce qui correspond avec une productivité donnée de 10 tonnes/hectare, à une biocapacité de 100 hectares. Ce qu’il faut garder à l’esprit c’est que derrière les hectares c’est la capacité productive de ces hectares qui nous intéresse. Le choix de l’unité deviendra clair ultérieurement.

Produit	Biocap. (ha réels)	Rend. (t/ha/an)	Prod. pot. (t/an)
Blé	100	10	1000

TABLE 1 – Biocapacité pour le modèle mono-consommation, mono-surface.

2.2 Empreinte écologique

L’**empreinte écologique** est calculée dans le tableau 2. Elle mesure la biocapacité effectivement utilisée. Cette utilisation peut être de deux natures différentes. L’une est une consommation effective de biocapacité, c’est à dire que le potentiel de production est mobilisé. L’autre est une utilisation directe de l’espace pour d’autres fins, la biocapacité n’est ici pas utilisée mais bloquée. Dans notre cas, il s’agit de l’espace requis pour le village. Le village utilise 5 hectares

de biocapacité. Son empreinte est donc de 5 hectares. La consommation de blé requiert la production de blé sur 45 hectares. Son empreinte est donc de 45 hectares. Au total, l'empreinte est de $45 + 5 = 50$ hectares. Comparé à la biocapacité de 100 hectares, il reste 50 hectares de biocapacité sur le territoire non exploité. Exprimé en tonnes, alors que la biocapacité non bloquée permettrait de produire 950 tonnes de blé seulement 450 sont produits. On voit ici avec la biocapacité bloquée pourquoi on utilise l'unité de l'hectare qui se mesure dans ce cas directement.

	Quantité (t/an)	Rend. (t/ha/an)	Empreinte (ha réels)
Conso.			
- Blé	450	10	45
Biocap.			
- Village	-	-	5
Total	-	-	50

TABLE 2 – Empreinte pour le modèle mono-consommation, mono-surface, population=1000.

2.3 Dépassement écologique

Imaginons maintenant que la population double pour s'établir à 2000 personnes et que la consommation et la surface du village doublent eux aussi. La biocapacité est inchangée et reste à 100 hectares, par contre l'empreinte a maintenant doublée (voir table 3) et est égale à la biocapacité. Celle-ci est maintenant entièrement exploitée. Si la population continue à croître et s'établit à 3000 personnes, alors selon la terminologie de l'empreinte écologique, il y a un **dépassement écologique**. Ici, il est de 50 hectares (voir table 4), c'est à dire qu'il manque 50 hectares en biocapacité pour satisfaire la demande de la population.

	Quantité (t/an)	Rend. (t/ha/an)	Empreinte (ha réels)
Conso.			
- Blé	900	10	90
Biocap.			
- Village	-	-	10
Total	-	-	100

TABLE 3 – Empreinte pour le modèle mono-consommation, mono-surface, population=2000.

Ce cas n'est cependant pas impossible s'il existe des stocks de blé des années antérieures. Imaginons que ces stocks soient par exemple de 5000 tonnes de blé, alors le dépassement écologique pourrait durer 10 ans.

	Quantité (t/an)	Rend. (t/ha/an)	Empreinte (ha réels)
Conso.			
- Blé	1350	10	135
Biocap.			
- Village	-	-	15
Total	-	-	150

TABLE 4 – Empreinte pour le modèle mono-consommation, mono-surface, population=3000.

2.4 Revenir à l'équilibre écologique

Considérons maintenant qu'il existe des paramètres permettant d'influer sur la productivité ou l'empreinte et que la population ait la volonté de rétablir un solde nul ou positif entre biocapacité et empreinte. Imaginons que la productivité soit directement proportionnelle au temps de travail et que le temps de travail est aujourd'hui de six heures quotidiennes. La productivité requise pour équilibrer est de $1350/(100-15) = 16t/ha$ et donc il faudrait travailler $1,6 * 6 = 9,6h$ par jour pour atteindre cette productivité. Le solde écologique redeviendrait nul dans ce cas (table 5).

	Quantité (t/an)	Rend. (t/ha/an)	Empreinte (ha réels)
Conso.			
- Blé	1350	16	85
Biocap.			
- Village	-	-	15
Total	-	-	100

TABLE 5 – Empreinte pour le modèle mono-consommation, mono-surface, population=3000, productivité multipliée.

Une autre paramètre que l'on peut imaginer est la densité de population du village. Le village pourrait décider de n'occuper qu'un tiers de son espace actuel et de consacrer les 10 hectares libérés à la production de blé. Cependant dans notre cas cela ne suffirait pas à supprimer le dépassement écologique. Mais cela pourrait contribuer à diminuer la durée du travail de la 1ère solution. Après calcul cela donnerait 8,4h, une bonne heure en moins.

Le dernier paramètre que l'on peut imaginer est la variable démographique, si le village peut contrôler son taux de natalité. *A compléter...*

La présentation de ce premier modèle a permis de présenter la terminologie et les principales notions, **biocapacité**, **empreinte écologique** et **dépassement écologique**. Ce premier modèle montre aussi les principaux facteurs qui peuvent influer sur l'empreinte, **productivité**, **démographie** et **espace bâti**.

3 Hectare global, hectare réel et facteurs de récolte

Nous introduisons ici les notions importantes **d’hectare global** vis à vis **des hectares réels** ainsi que **les facteurs de récolte** qui permettent de passer de l’un à l’autre. L’hectare global correspond à un hectare de productivité moyenne. Ainsi un hectare réel ayant une productivité deux fois moindre que la moyenne vaut 0,5 hectares globaux. Pour un hectare réel ayant une productivité double alors il équivaut à 2 hectares globaux.

Considérons que notre territoire défini précédemment soit composé de deux régions de superficies égales et que la population se répartisse également entre les deux, ainsi que la surface des deux villages. La biocapacité est calculée dans la table 6. Nous voyons apparaître deux unités possibles pour la biocapacité, les hectares réels et les hectares globaux. De manière générale Les hectares réels seront utilisés quand on considère le sous-territoire comme fermé, et les hectares globaux le seront quand on considère le sous-territoire comme ouvert avec la possibilité d’échanges entre les régions. Notons que la somme totale des hectares réels est égale à la somme totale des hectares globaux. C’est seulement à l’échelle de régions que les deux divergent.

Produit	Région	Biocap. (ha réels)	Rend. (t/ha/an)	Prod. pot. (t/an)	Fac. de récolte	Biocap. (ha glob.)
Blé	1	50	15	750	1,5	75
	2	50	5	250	0,5	25
	1+2	100	10	1000	1	100

TABLE 6 – Biocapacité pour le modèle mono-consommation, mono-surface, deux régions.

Calculons maintenant l’empreinte sur les deux sous-territoires à la fois en hectare globaux et réels.

	Région	Quantité (t/an)	Rend. (t/ha/an)	Empreinte (ha réels)	Fac. de récolte	Empreinte (hag)
Conso.						
- Blé	1	225	15	15	1,5	22,5
	2	225	5	45	0,5	22,5
	1+2	450	10	60	1	45
Biocap.						
- Village	1	-	-	2,5	1,5	3,75
	2	-	-	2,5	0,5	1,25
	1+2	-	-	5	1	5
Totaux.						
	1	-	-	17,5	1,5	26,25
	2	-	-	47,5	0,5	23,75
	1+2	-	-	65	-	50

TABLE 7 – Empreinte pour le modèle mono-consommation, mono-surface, deux régions.

Il est intéressant de constater dans ce calcul que contrairement à la biocapacité l’empreinte calculée en hectares réels est différente de l’empreinte en hectares globaux. La raison est que le calcul en hectare globaux assume que la production est répartie sur les terres avec des productivités différentes de manière à ce que la productivité moyenne des terres **effectivement** cultivées est égale à la productivité moyenne **potentielle** de l’ensemble des terres. Dans notre cas, la productivité effective moyenne est $(15 * 17,5 + 5 * 47,5)/65 = 7,7t/ha$ à comparer avec la productivité totale potentielle moyenne de 10 hectare.

Notons que **cela ne correspond pas non plus à la situation optimale** qui voudrait qu’on utilise d’abord les terres les plus productives et seulement ensuite les terres les moins productives, ce qui dans notre cas donnerait une productivité moyenne des terres effectivement cultivées supérieure à la moyenne globale. Dans ce cas il faudrait seulement 30 hectares des terres les plus productives pour nourrir les deux populations ce qui donnerait une empreinte réelle optimale de 35 hectares.

Nous voyons ainsi que le calcul en hectare global ne nous renseigne pas sur l’empreinte en hectare réel qui dans notre simple exemple peut varier du simple au double.

En fait l’utilisation de l’hectare global linéarise les relations entre consommation et empreinte. *A compléter*

4 Facteurs d’équivalence

Nous introduisons ici **les facteurs d’équivalence** entre deux types de surface. Dans notre nouveau modèle, nous considérons un territoire partagé entre surface arable et forêts. Les autres caractéristiques sont les mêmes que celles du premier modèle avec maintenant une consommation de bois de 250t/an. Les deux types de surfaces ont des productions différentes, du blé pour la surface arable et du bois pour la forêt. Cependant chaque surface peut être utilisée pour l’un ou l’autre avec des productivités différentes. Du fait de leurs caractéristiques différentes un hectare de forêt n’est pas équivalent à un hectare arable. Pour pondérer les hectares on n’utilise cependant pas la productivité pour chaque produit vu qu’on ne peut comparer une tonne de bois avec une tonne de blé. Pour pondérer on regarde la productivité qu’aurait la forêt si par déforestation on la transformait en terre arable. La pondération est donc faite en considérant le rendement en blé des deux types de sols. Dans notre cas bien que le rendement en blé et bois de 10t par an pour les surfaces arables et forêt les rendements pour le blé seul sont 10 et 5 ce qui nous donne **des facteurs d’équivalence** de $\frac{10*(70+30)}{10*70+5*30} = 1,18$ et $\frac{5*(70+30)}{10*70+5*30} = 0,59$.

4.1 Biocapacité

La biocapacité est calculée sur la table 8. On constate du fait que les surfaces arables sont plus productives que les forêts, que leur biocapacité en hectare global est supérieure au nombre d’hectares réels et vice-versa. Par contre, au total le nombre d’hectares globaux est égal au nombre d’hectares réels, illustrant bien que les hectares globaux sont des hectares réels pondérés.

4.2 Empreinte écologique

Nous calculons l’empreinte écologique dans la table 9. Elle est maintenant calculée pour les deux types de surface. Comme avec les facteurs de récolte, l’empreinte en hectare globaux

Produit	Surface	Biocap. (ha réels)	Rend. (t/ha/an)	Prod. pot. (t/an)	Rend. blé (t/ha/an)	Fac. d' équiv.	Biocap. (ha glob.)
Blé	Arable	70	10	700	10	1,18	82,5
Bois	Forêt	30	10	300	5	0,59	17,5
Total		100	-	-	-	1	100

TABLE 8 – Biocapacité pour le modèle à deux consommations sur deux types de surfaces.

est différente de l’empreinte en hectare réel à la fois pour chaque type de surface mais aussi pour le total. Les deux types d’hectares ne pourrait être égaux que si les terres arables et les forêts étaient exploitées dans les mêmes proportions (par exemple 60% des terres arables et forêts exploitées). Si ce n’est pas le cas les hectares globaux ne correspondent pas à une surface effective.

	Quantité	Rend. (t/an)	Empreinte (ha réels)	Fac. d' équiv.	Empreinte (hag)
Conso.					
- Blé	450	10	45	1,18	53,1
- Bois	250	10	25	0,59	14,75
Biocap.					
- Village	-	-	5	1,18	5,9
Totaux					
- Arable	-	-	50	1,18	59
- Forêt	-	-	25	0,59	14,75
- Arable+Forêt	-	-	75	-	73,75

TABLE 9 – Empreinte pour le modèle à deux consommations sur deux types de surfaces.

4.3 Dépassement écologique partiel

Avec deux types de surfaces il devient possible d’observer des dépassements écologiques sur un seul type de surface, que l’on dénomme **dépassement écologique partiel**. Sur l’exemple de la table 10, si la consommation de bois passe de 250 à 500 tonnes par an on obtient une empreinte écologique sur les surfaces forestière à 29,5 en dépassement de 12 hectares globaux. Par contre pour le blé, il y a encore 23 hectare globaux de biocapacité disponible ce qui laisse au total un surplus de 11,5 hectares de biocapacité. L’utilisation d’une unité de mesure commune induit l’idée d’une possibilité de substitution entre les différents types de surface, ce qui est effectivement le cas du point de vue de l’empreinte. Il est alors imaginable en cas de manque de bois de planter les surfaces arables en forêt. Il faut cependant noter que dans le cas ou une telle solution était préconisée les coefficients d’équivalence 1,18 et 0,59 seraient modifiés car basés sur la productivité des forêts et des cultures sur leur sol **actuel**.

	Quantité	Rend. (t/an)	Empreinte (ha réels)	Fac. d' équiv.	Empreinte (hag)
Conso.					
- Blé	450	10	45	1,18	53,1
- Bois	500	10	50	0,59	29,5
Biocapacité retenue					
- Village	-	-	5	1,18	5,9
Totaux					
- Arable	-	-	50	-	59
- Forêt	-	-	50	-	29,5
- Arable+Forêt	-	-	100	-	88,5

TABLE 10 – Empreinte pour le modèle à deux consommations sur deux types de surfaces avec dépassement écologique partiel

4.4 Calcul sur deux régions

Il est maintenant possible de combiner deux régions et deux types de surface, ou facteurs de récolte et facteurs d'équivalence. La biocapacité est calculé dans la table 11 et l'empreinte dans la table 12. On le constate encore une fois et de manière encore plus marquée les hectares globaux ne reflète plus les hectares réels. Pour passer de l'un à l'autre il faudrait combiner des moyennes pondérés par les surfaces effectives à la fois des facteurs de récolte et des facteurs d'équivalence.

Produit	Région	Biocap. (ha réels)	Rend. (t/ha/an)	Prod. pot. (t/an)	Fac. de récolte	Fac. d' équiv.	Biocap. (ha glob.)
Blé	1	35	15	525	1,5	1,18	62
	2	35	5	175	0,5	1,18	20,5
	1+2	70	10	700	-	-	82,5
Bois	1	15	12	180	1,2	0,59	10,5
	2	15	8	120	0,8	0,59	7
	1+2	30	10	300	-	-	17,5
Totaux	1	50	-	-	-	-	72,5
	2	50	-	-	-	-	27,5
	1+2	100	-	-	-	-	100

TABLE 11 – Biocapacité pour le modèle à deux consommations, deux surfaces, deux régions.

	Région	Quantité (t/an)	Rend. (t/ha/an)	Empreinte (ha réels)	Fac. de récolte	Fac. d' équiv.	Empreinte (hag)
Conso							
	1	225	15	15	1,5	1,18	26,55
- Blé	2	225	5	45	0,5	1,18	26,55
	1+2	450	10	60	-	-	53,1
	1	125	12	10,4	1,2	0,59	7,36
- Bois	2	125	8	15,6	0,8	0,59	7,36
	1+2	250	10	26	-	-	11,1
Biocap							
	1	-	-	2,5	1,5	1,18	4,425
- Village	2	-	-	2,5	0,5	1,18	1,475
	1+2	-	-	5	-	-	5,9
Totaux							
	1	-	-	17,5	1,5	1,18	30,98
- Arable	2	-	-	47,5	0,5	1,18	28,03
	1+2	-	-	65	-	-	59
	1	-	-	10,4	1,2	0,59	7,36
- Forêt	2	-	-	15,6	0,8	0,59	7,36
	1+2	-	-	26	-	-	14,72
- Arable	1	-	-	27,9	-	-	38,34
+	2	-	-	63,1	-	-	35,39
Forêt	1+2	-	-	91	-	-	73,72

TABLE 12 – Empreinte pour le modèle à deux consommations, deux surfaces, deux régions.

5 Production secondaire et coefficients d'efficience

Nous appelons produits secondaire des produits qui nécessite la transformation d'autres produits (primaires ou eux même secondaires) pour le produire. Le calcul de l'empreinte nécessite alors des étapes supplémentaires pour convertir une quantité de produits secondaires en produits primaires à partir desquels l'empreinte peut être calculée. Cette conversion se fait à partir **des coefficients d'efficience**. Nous verrons que comme pour les productivités ceux-ci peuvent être globaux ou locaux.

5.1 Un territoire unique

Reprenons notre modèle initial mais cette fois le blé n'est pas consommé directement, il est d'abord transformé en pain et il faut 2kg de blé pour produire 1kg de pain. Ainsi nous introduisons les coefficients d'efficience exprimés en unité de produit secondaire par unité de primaire (peut être kg/kg, joule/kg, euros/kg... suivant les différents usages.).

	Primaire	Quantité (t sec./an)	Coeff. transf. (t pri/t sec)	Rend. pri. (t/ha/an)	Empreinte (ha réels=hag)
Conso.					
- Pain	Blé	225	2	10	45
Biocap.					
- Village		-	-	-	5
Total		-	-	-	50

TABLE 13 – Empreinte pour le modèle mono-consommation de produit secondaire, mono-surface.

5.2 Deux régions

Reprenons le modèle sur deux régions et imaginons que les coefficients de conversions secondaire/primaire sont la seule différence entre les deux régions, reflétant des niveaux technologiques différents par exemple. Le calcul est opéré dans la table 14 Notons ici une caractéristique essentielle qui diffère de ce qui a été vu plus haut. L’empreinte en hectares réels et en hectares globaux coïncident. Il n’y a pas d’équivalent des facteurs de récolte comme pour les produits primaires. Il est notoire que cela constitue une inconsistance méthodologique dans les calculs de l’empreinte et une asymétrie de traitement entre produits primaires et secondaires qui n’a pas lieu d’être. Notons que dans les calculs réels se combinent coefficient de conversion, facteur de récolte et facteurs d’équivalence qui entraînent que dans tous les cas les résultats en hectares globaux sont différents des résultats en hectares réels, et explique en partie pourquoi une telle incohérence a pu subsisté aussi longtemps. Notons aussi que ce genre d’erreur n’induit pas d’erreur au niveau du total. En fait il y a des raisons qui justifie les deux approches mais ce qui est troublant ici est l’inconsistance entre les deux. C’est pourquoi dans Wiedmann and Lenzen [2006] il est proposé de revoir la méthode de calculs est de choisir de manière consistante entre hectares réels ou hectare globaux. Ce qui revient pour les produits primaires à utiliser ou pas les facteurs de récolte et pour les produits secondaires à utiliser des coefficients d’efficience globaux ou locaux.

6 Formalisme mathématique

Les exemples ci-dessus peuvent être étendus et généralisés². En effet chaque produit secondaire peut lui même rentrer dans le processus de production d’un produit tertiaire et ainsi de suite jusqu’au produit final. Ainsi le blé sert à produire la farine qui sert à fabriquer le pain qui lui même peut être un composant d’un menu au restaurant. Et si l’on veut calculer l’empreinte lié au blé qui va dans la farine du pain dans le menu du restaurant on obtient une formule de ce type :

$$E_{ijkm} = \frac{\epsilon_{l(i)}}{y_i} \chi_{ij} \chi_{jk} \chi_{kl} c_m \quad (1)$$

où $l(i)$ est le type de surface pour le blé(arable), $\epsilon_{l(i)}$ est le facteur d’équivalence de ce type de surface, y_i et le rendement du blé, χ_{ij} est la quantité de blé utilisé par unité de farine(kg/kg),

2. Nous reprenons ici les éléments de Wiedmann and Lenzen [2006]

	Prim.	Terr.	Quantité (t/an)	Coeff. transf. (t sec./t pri.)	Rend. (t pri./ha/an)	Empr. (ha réels)	Empr. (hag)
Conso							
		1	112,5	2,5	10	28,125	28,125
- Pain	Blé	2	112,5	1,5	10	16,875	16,875
		1+2	450	2	10	45	45
Biocap							
		1	-	-	-	2,5	2,5
- Village		2	-	-	-	2,5	2,5
		1+2	-	-	-	5	5
Totaux							
		1	-	-	-	30,63	30,63
		2	-	-	-	19,37	19,37
		1+2	-	-	-	50	50

TABLE 14 – Empreinte pour le modèle mono-consommation de produit secondaire, mono-surface, deux régions.

χ_{jk} est la quantité de farine utilisée par unité de pain(kg/kg), et χ_{kl} est la quantité de pain par euros dépensées au restaurant (kg/euros) et c_m est le montant des dépenses dans les restaurants.

D'une manière générale l'empreinte écologique totale est une somme infini de chaînes imbriquées, de tous les produits primaires α , de tous les produits finaux Ω , sur toutes les longueurs possible 1, ..., ∞ .

$$\begin{aligned}
E &= \sum_{\alpha} \frac{\epsilon_{l(\alpha)}}{y'_{\alpha}} \sum_j \chi_{\alpha j} \sum_k \chi_{jk} \sum_l \chi_{kl} \dots \sum_{\Omega} \chi_{m\Omega} c_{\Omega} \\
&= \sum_{\alpha j k l \dots m \Omega} \frac{\epsilon_{l(\alpha)}}{y'_{\alpha}} \chi_{\alpha j} \chi_{jk} \chi_{kl} \dots \chi_{m\Omega} c_{\Omega}
\end{aligned}$$

Wiedmann and Lenzen [2006] ont montré que cette équation pouvait être exprimée sous un formalisme d'entrée-sortie en unités physiques que nous développerons dans la section suivante.

A compléter (2)

7 Analyse entrée-sortie

Comme nous venons de le voir les calculs de l'empreinte s'intègrent naturellement dans un cadre d'analyse entrée-sortie. L'analyse entrée-sortie est basée sur une désagrégation par secteur industriel des comptes nationaux, où les entrées pour chaque secteur et les sorties de ceux-ci sont identifiés séparément³. L'utilisation primaire de ce type d'analyse est de quantifier l'interdépendance des différents secteurs de l'économie. Elle utilise du simple calcul matriciel pour tracer l'utilisation directe, indirecte et induite des ressources incorporées dans la consommation.

3. Une référence sur le sujet est Miller and Blair [2009]

Nous illustrerons son utilisation à partir de simple exemples ce qui nous permettra d'introduire les notions d'**empreinte production** et d'**empreinte consommation**.

7.1 Territoire unique

Dans notre nouveau modèle il existe des industries du blé et du bois. Le bois fournit l'énergie et les matériaux. L'industrie du blé consomme de l'énergie et des matériaux, traduit en quantité de bois. Elle utilise aussi les graines de blé de récoltes passées. De même la production de bois utilise du bois pour l'énergie et les matériaux nécessaires. Le tableau 15 d'entrée-sortie du territoire est :

		Consommation intermédiaire				
		Blé	Bois	Total CI	CF	CT
Production	Blé	50	0	50	450	500
	Bois	100	50	150	250	400

TABLE 15 – Tableau entrée-sortie de la région

Pour obtenir la matrice des coefficients techniques **A** correspondants il faut diviser chaque éléments en colonne par le total de la ligne correspondante, c'est à dire la colonne blé est divisé par le total de blé en ligne, pareil pour colonne bois et ligne bois. L'élément de la ligne bois colonne blé est la quantité de bois qu'il faut produire pour 1 unité de blé. Cela donne

	Blé	Bois
Blé	0,1	0
Bois	0,2	0,125

TABLE 16 – Coefficients techniques (la matrice **A**) du territoire

On établit facilement la relation où **C** désigne un vecteur contenant la consommation finale, **P** est le vecteur de la production et **I** une matrice diagonale identité :

$$\mathbf{C} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 - 0,1 & -0 \\ -0,2 & 1 - 0,125 \end{bmatrix} \mathbf{P}$$

Vérifions que cette relation redonne nos données initiales.

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0,9 & -0 \\ -0,2 & 0,875 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 500 \\ 400 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 450 \\ 250 \end{bmatrix}$$

Imaginons maintenant que nous ne connaissons que la consommation finale. Imaginons qu'en première approximation nous ne décidions de produire que ces quantités. Observons le résultat :

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0,9 & -0 \\ -0,2 & 0,875 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 450 \\ 250 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 405 \\ 129 \end{bmatrix}$$

Comme on s'y entendait la consommation disponible est inférieure à la consommation requise. Pour trouver le bon résultat il serait possible de tâtonner sur la production mais plus simplement le résultat peut être exprimé en inversant la matrice :

$$\mathbf{P} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0,9 & -0 \\ -0,2 & 0,875 \end{bmatrix}^{-1} \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1,11 & 0 \\ 0,25 & 1,14 \end{bmatrix} \mathbf{C}$$

Dans le cadre d'analyse entrée-sortie la matrice $(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ est notée \mathbf{L} et s'appelle la matrice de Léontief inverse. Vérifions que nous obtenons le bon résultat :

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1,11 & 0 \\ 0,25 & 1,14 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 450 \\ 250 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 500 \\ 400 \end{bmatrix}$$

Calculons maintenant l'empreinte liée au CI et à la consommation finale.

	CI			CF	CT	Rend.	Fac. d'	ECI			ECF	ECT
	Blé	Bois	Tot.			(t/ha/an)	équiv.	Blé	Bois	Tot.		
Blé	50	0	50	450	500	10	1,18	5,9	0	5,9	53,1	59
Bois	100	50	150	250	400	10	0,59	5,9	2,95	8,85	14,75	23,6

TABLE 17 – Tableau entrées-sorties et empreinte écologique de la production.

On obtient ainsi un tableau entrée sortie où les unités sont des hectares globaux.

Vérifions que nous pouvons retrouver le résultat en appliquant du matriciel. Avec $\hat{\mathbf{y}}^{-1}$ la matrice diagonalisée inverse des rendements et ϵ la matrice diagonale des coefficients d'équivalences correspondant à nos rendements, on peut construire une matrice d'impact

$$\Omega = \epsilon \hat{\mathbf{y}} = \begin{bmatrix} 1,18 & 0 \\ 0 & 0,59 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{10} & 0 \\ 0 & \frac{1}{10} \end{bmatrix}.$$

Si on appelle \mathbf{E}_p le vecteur colonne représentant l'empreinte de la production (chaque ligne est l'empreinte du secteur de production correspondant) alors :

$$\mathbf{E}_p = \Omega \mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1,18 & 0 \\ 0 & 0,59 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{10} & 0 \\ 0 & \frac{1}{10} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 500 \\ 400 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 59 \\ 23,6 \end{bmatrix}$$

On vérifie que cela redonne le bon résultat.

Nous sommes maintenant prêts à introduire l'**empreinte production** et **empreinte consommation**. Reprenons la partie droite du tableau 17 et faisons passer la colonne ECF (empreinte de la consommation finale en ligne) et additionnons. Observons le résultat dans la table 18. Nous avons maintenant pour chaque produit blé et bois un total en ligne et un total en colonne. Le total en ligne correspond à l'empreinte de la production de blé ou de bois sans se soucier

de leur destination finale. Le total en colonne que nous appelons empreinte consommation est l’empreinte de la production requise pour obtenir le produit final. Ainsi l’empreinte lié au bois nécessaire à la production de blé est allouée au blé. Cependant cette méthode de calcul n’est pas exacte, elle ne prend en compte que les effets directs dûs à la structure d’entrée sortie(d’un point de vue mathématique, elle est une approximation de premier ordre). Pour avoir un résultat exact il faut passer par le calcul matriciel.

	ECI			ECF	Empreinte Prod.
	Blé	Bois	Total		
Blé	5,9	0	5,9	53,1	59
Bois	5,9	3,62	9,52	14,75	24,25
Total	11,8	3,62	15,42	67,85	83,25
ECF	53,1	14,75	67,85		
Empreinte Conso	64,9	18,37	83,25		

TABLE 18 – Comparaison entre l’empreinte production et l’empreinte consommation avec effet direct de la consommation intermédiaire.

Sous forme matricielle il suffit de reprendre (2) et remplacer \mathbf{P} par $(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{C}$. Cela donne $\mathbf{E}_p = \mathbf{\Omega}(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{C}$. Cependant ce n’est pas l’empreinte production \mathbf{E}_p qui nous intéresse mais \mathbf{E}_c l’empreinte consommation. Pour obtenir \mathbf{E}_c il suffit pour chaque produit de construire un vecteur nul partout sauf pour le produit. Ainsi l’impact totale sur la production est dû au produit. Ainsi pour la consommation finale de blé de 450 tonnes cela donne :

$$\mathbf{E}_{c_1} = \mathbf{\Omega}(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1,18 & 0 \\ 0 & 0,59 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{10} & 0 \\ 0 & \frac{1}{10} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1,11 & 0 \\ 0,25 & 1,14 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 450 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 58,94 \\ 6,63 \end{bmatrix}$$

Ce qui nous donne une empreinte total de 65,57 ha pour la consommation finale de blé de 450t. Pour la consommation finale de bois de 250 tonnes cela donne :

$$\mathbf{E}_{c_2} = \mathbf{\Omega}(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1,18 & 0 \\ 0 & 0,59 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{10} & 0 \\ 0 & \frac{1}{10} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1,11 & 0 \\ 0,25 & 1,14 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 250 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 16,82 \end{bmatrix}$$

Nous voyons que nos résultats sont légèrement différents de ceux calculés dans la table 18, légèrement inférieurs pour l’empreinte bois et supérieurs pour le blé. C’est là qu’interviennent les effets de second ordre(ou effets indirects dans la terminologie de l’analyse entrée-sortie). En effet, pour une consommation finale de 450 tonnes de blé il fallait produire 500 tonnes de blé et 100 tonnes de bois qui ont bien été attribués à l’empreinte de la consommation de blé. Ce qui a cependant été omis c’est que produire ces 100 tonnes de bois, il fallait produire $100 * 0,125 = 12,5$ tonnes de bois qui n’ont pas été comptabilisés dans l’empreinte du blé. De même pour produire ces 12,5 tonnes il fallait aussi produire en plus $12,5 * 0,125 = 1,56$ et ainsi de suite selon une somme infini(qui converge). Cela explique la différence observée entre le calcul direct du tableau et le calcul matriciel exact.

Cette distinction entre empreinte production et consommation est fondamentale car du point de vue de l’empreinte c’est la seconde que l’on veut mesurer. En pratique ce n’est cependant

pas le cas car elle est plus difficile de la calculer. Dans les feuilles de calculs standards de l’empreinte écologique des nations hormis les calculs pour les importations et les exportations c’est essentiellement une empreinte production qui est calculé même si certaines opérations partielles sont effectuées pour les réallouer sur des catégories de consommation⁴. Il est aussi vrai qu’à un certain niveau d’agrégation cela a peu d’importance puisque comme on le voit les totaux sont les mêmes. L’empreinte écologique est théoriquement la même qu’on la calcule à partir de ces données de production ou de consommation. C’est seulement quand on veut analyser finement que cet aspect prend de l’importance.

7.2 Deux régions avec importation et exportation

Imaginons un nouveau modèle sur deux régions avec des échanges entre les deux régions que l’on répertorie sous les rubriques imports et exports. Les tableaux entrée-sorties sont différents entre les deux régions reflétant des technologies différentes. Remarquons que si on regarde nos deux régions de manière agrégées nous avons retrouvons les données de la table 17.

	CI		CF - Imp	Imp	Exp	Demand finale avec Exp.	Demand finale sans Exp.	
	Blé	Bois						Tot
R1								
- Blé	20	0	20	225	0	50	295	245
- Bois	60	30	90	125	0	50	265	215
R2								
- Blé	30	0	30	175	50	0	255	255
- Bois	40	20	60	75	50	0	185	185
R1+2								
- Blé	50	0	50	450	-	-	-	500
- Bois	100	50	150	250	-	-	-	400

TABLE 19 – Tableau entrées-sorties avec import-export sur deux régions, en tonnes

Da la même manière que précédemment nous pouvons changer l’unité de nos données de tonnes en hectares. Le résultat se trouve dans la table 20.

La subtilité ici est de savoir comment comptabiliser en hectares globales nos importations qui proviennent d’une autre structure productive. Dans le tableau, nous présentons les résultats que donnerait la conversion des importations en utilisant les facteurs de conversion de la région importatrice. On observe l’erreur importante si nous utilisons ces résultats au lieu de l’empreinte calculée en lieu et place de sa production au niveau de la région exportatrice. Ainsi l’empreinte blé produite est de 3,93 hectares au lieu de 11,8 hectares si on la calcule dans le pays importateur. Évidemment, ces calculs ne sont possibles que si l’on connaît le lieu d’importation ce qui dans notre modèle à deux régions est immédiat mais dès qu’il y en plus implique de désagréger nos données d’importation. Ce n’est pas le cas aujourd’hui dans les calculs nationaux de l’empreinte écologique. Dans ceux-ci ce sont donc des moyennes mondiales qui sont utilisées pour calculer l’empreinte des produits. Ceci n’est évidemment pas satisfaisant et des efforts sont conduits pour avoir une analyse plus fine des importations.

4. Voir Wiedmann [2009] pour une compréhension détaillée de ces aspects

	Blé	CI Bois	Tot	CF - Imp	Imp	Exp	Demand finale avec Exp.	Demand finale sans Exp.
R1								
- Blé	1,57	0	1,57	17,7	0	3,93	23,21	19,27
- Bois	2,95	1,48	4,43	6,15	0	2,46	13,03	10,57
- Total	4,52	1,48	6	23,85	0	6,39	36,24	29,85
CF-Imp	17,7	6,15	23,85					
Empreinte Conso	22,22	7,62	29,85					
Empreinte Export	3,93	2,46	6,39					
R2								
- Blé	7,08	0	7,08	41,3	11,8	0	52,31	52,31
- Bois	2,95	1,48	4,43	5,53	3,69	0	12,41	12,41
- Total	10,03	1,48	11,51	46,83	15,49	0	64,73	64,73
CF-Imp	41,3	5,53	46,83					
Empreinte Import	3,93	2,46	6,39					
Empreinte Conso	55,26	9,46	64,73					
R1+2								
- Blé	8,65	0	8,65	62,93	-	-	-	71,58
- Bois	5,9	2,95	8,85	14,14	-	-	-	22,98
- Total	14,55	2,95	17,5	77,07	-	-	-	94,56
CF	59	11,68	70,68					
Empreinte Conso.	77,49	17,09	94,57					

TABLE 20 – Comparaison entre l’empreinte production et l’empreinte consommation pour deux régions avec import.

Comme précédemment nos calculs peuvent être mené de manières exactes sous forme matricielle en construisant une table d’entrée-sortie multirégionale : *A compléter*

8 Vers des calculs locaux de l’empreinte

Les calculs locaux de l’empreinte se différencie des calculs globaux par le fait qu’ils ne sont pas le résultat d’un calcul direct. Il ne s’agit donc pas d’une simple différence d’échelle mais le fait que l’entité observée est directement regardée comme faisant partie d’un ensemble plus grand. Si on pouvait traiter une ville comme une nation alors les calculs globaux serait adéquats. Ainsi dans le cadre des calculs locaux les résultats des calculs à l’échelle supérieure servent comme **données** de base pour les calculs. La méthode générique est ensuite toujours la même, on regarde les calculs globaux de manière désagrégée par composantes et on modifie certaines composantes en fonction des spécificités locales. On note immédiatement que la forte dépendance des données globales va probablement limiter singulièrement la possibilités de modifier l’empreinte locale, même si des efforts sont fait dans ce sens. On peut montrer de nom-

breux exemples où des actions d'amélioration de l'empreinte ne se répercutent pas les calculs locaux mais seulement dans les calculs globaux. Le formalisme des calculs de l'empreinte impose une certaine "**mise en commun**" des efforts sur l'empreinte ce qui n'est pas un problème quand on regarde à l'échelle nationale mais qui le devient quand on le regarde à l'échelle locale. Il s'agit donc d'un enjeu majeur que les calculs locaux soient conduites de manière assez fine pour pouvoir capturer les composantes non-communes et représentatives des spécificités locales, voire même de développer des méthodologies alternatives en particulier le changement d'unités, des hectare globaux en hectares réels.

Nous présenterons ainsi différentes méthodes de calculs de l'empreinte écologique locale des plus simples au plus sophistiquées.

8.1 Une simple déclinaison des calculs globaux

8.2 Par ajustement de la consommation directe

8.3 Prise en compte des consommations indirectes

9 Conclusion

Références

- A. Galli, Justin Kitzes, P. Wermer, M. Wackernagel, V. Niccolluci, and E. Tiezi. An exploration of the mathematics behind the ecological footprint. *International Journal of Ecodynamics*, 2, 2007.
- Justin Kitzes and al. A research agenda for improving national ecological footprint accounts. *Ecological Economics*, 68, 2009.
- Justin Kitzes and M. Wackernagel. Answers to common questions in ecological footprint accounting. *Ecological Indicators*, 9, 2009.
- L. Lewan and C. Simmons. The use of ecological footprint and biocapacity analyses as sustainability indicators for sub-national geographical areas : a recommended way forward. *Final Report. European Common Indicators Project Eurocities/Ambiente Italia*, 2001.
- Ronald Miller and Peter Blair. *Input-output Analysis, Foundations and Extensions, 2nd Revised edition*. Cambridge University Press, 2009.
- Daniel Moran and al. Trading spaces : Calculating embodied Ecological Footprints in international trade using a Product Land Use Matrix(PLUM). *Ecological Economics*, 2009.
- Karen Turner, Manfred Lenzen, Thomas Wiedmann, and John Barrett. Examining the global environmental impact of regional consumption activities - part 1 : A technical note on combining input-output and ecological footprint analysis. *Ecological Economics*, 62, 2006.
- Mathis Wackernagel and William Rees. *Our Ecological Footprint : Reducing Human Impact on the Earth*. New Society Publishers, Gabriola Island, BC, 1996.
- Thomas Wiedmann. A first empirical comparison of energy Footprints embodied in trade - MRIO versus PLUM. *Ecological Economics*, 68, 2009.
- Thomas Wiedmann and Manfred Lenzen. On the conversion between local and global hectares in ecological footprint analysis. *Ecological Economics*, 60, 2006.
- Thomas Wiedmann, Jan Minx, John Barrett, and Mathis Wackernagel. Allocating ecological footprints to final consumption categories with input-output analysis. *Ecological Economics*, 56, 2006.