

Empreinte forêt : quel indice pour la mise en œuvre de la Stratégie nationale de lutte contre la déforestation importée ?



Nicolas Picard (nicolas.picard@gip-ecofor.org)

GIP ECOFOR, Paris

9 septembre 2020

Résumé

La consommation par la France de produits agricoles importés est susceptible d'induire une demande de terres agricoles supplémentaires dans les pays producteurs, donc de la conversion de forêts en terres agricoles : c'est la déforestation importée. La mise en œuvre de la Stratégie nationale de lutte contre la déforestation importée (SNDI) mise en place par la France en 2018 nécessite de suivre l'impact de la consommation française sur la déforestation dans les pays producteurs. Cet impact peut être quantifié à l'aide d'indices mesurant l'empreinte déforestation de la France. L'objectif de cette note est de comparer trois calculateurs d'empreinte déforestation : celui développé par Envol Vert, celui du WWF France et celui de l'UICN. Les calculateurs d'Envol Vert et du WWF obtiennent l'empreinte déforestation en multipliant l'empreinte forêt (i.e. la surface de terres mobilisées par la consommation française de produits agricoles importés) par le risque de déforestation. Ce risque de déforestation est un indice composite agrégeant différentes statistiques liées à la déforestation mais n'est pas calculé directement en fonction des surfaces déforestées telles qu'elles peuvent être observées par télédétection. Le calculateur de l'UICN relie pour sa part les surfaces déforestées de chaque pays (données de la FAO) à des produits agricoles considérés comme responsables de cette déforestation.

Le calcul de l'empreinte forêt en fonction de la consommation française procède de différentes façons selon les calculateurs. Le calculateur d'Envol Vert convertit globalement la consommation française de chaque produit en surfaces de terres nécessaires à sa production, sans retracer les liens entre la France et les pays producteurs. Une telle approche n'est guère compatible avec les objectifs de la SNDI. Les calculateurs du WWF et de l'UICN retracent les liens entre pays consommateurs et pays producteurs de deux façons différentes : le calculateur du WWF procède par comptabilité des flux de matière, c'est-à-dire en retraçant les flux d'échanges de produits entre pays à travers leurs importations et leurs exportations ; le calculateur de l'UICN utilise une table d'entrée-sortie multirégionale, c'est-à-dire tient compte des interdépendances entre les différents secteurs de l'économie mondiale pour la production des produits finaux. L'approche par comptabilité des flux de matière a l'avantage de permettre de se focaliser de manière très fine sur les produits importés mais a l'inconvénient que ces produits à suivre doivent être défini *a priori*. La consommation de nouveaux produits induisant une nouvelle forme de déforestation importée ne serait pas détectée avec cette approche. L'approche par table d'entrée-sortie multirégionale a à l'inverse l'avantage de couvrir l'ensemble de l'économie mondiale, mais ce qui est gagné au niveau de la couverture des différentes filières

est perdu en terme de niveau de détails au sein de chacune d'entre elles.

Une avancée dans les calculateurs d'empreinte déforestation proviendra en premier lieu d'une meilleure intégration entre le calcul de l'empreinte forêt et l'estimation de la déforestation. Ces progrès demanderont un rapprochement entre la communauté des économistes (qui est la communauté scientifique qui a développé les indices d'empreinte forêt) et la communauté des télédéTECTEURS (qui est la communauté scientifique qui mesure la déforestation).

Mots clés : déforestation importée, empreinte forêt, empreinte déforestation

1 Introduction

L'objectif 1 « Comprendre les mécanismes de la déforestation » de la Stratégie nationale de lutte contre la déforestation importée (SNDI) 2018-2030 prévoit de « structurer et mobiliser l'expertise scientifique française autour d'un programme partagé », dont une thématique sera notamment « le calcul de l'empreinte forêt de la France à l'étranger afin d'évaluer de manière plus fine les efforts à fournir pour parvenir à mettre un terme à la déforestation importée en 2030 ». Plusieurs calculateurs d'empreinte forêt de la France ont d'ores et déjà été développés, notamment par le WWF France (2018) et Envol Vert (2018). Un calculateur d'empreinte à l'échelle planétaire a également été développé par l'UICN (Philippe Puydarrieux et Damien Mittempergher, communication personnelle), même si aucune publication documentant ce calculateur n'est encore disponible. Le calcul des empreintes écologiques, notamment les empreintes sols, a par ailleurs fait l'objet de nombreuses recherches dans le domaine de l'économie forestière (par exemple Persson et al., 2014a ; O'Brien et al., 2015 ; O'Brien et Bringezu, 2018). Dans le même temps, la cartographie de la déforestation à l'échelle mondiale a fait également l'objet de nombreuses recherches dans le domaine de la télédétection (par exemple Hansen et al., 2010).

Dans la perspective de la préparation d'un programme de recherche accompagnant la SNDI, l'objectif de cette note est de faire un point sur les méthodes de calcul de l'empreinte forêt de la France, avec un focus particulier sur les calculateurs du WWF, d'Envol Vert et de l'UICN, afin d'évaluer les limites des méthodes actuelles et les besoins de connaissances à acquérir pour faire de ces calculateurs d'empreinte forêt des outils opérationnels pour le suivi de la SNDI.

1.1 L'empreinte écologique, un indice de développement durable

Le concept d'empreinte écologique a été développé au début des années 1990 par Wackernagel et Rees (1996) pour estimer la consommation des ressources naturelles par l'homme et sa production de déchets en termes de surfaces d'écosystèmes. Le pendant de l'empreinte écologique est la capacité productive de la biosphère, c'est-à-dire la surface des zones productives disponible pour produire ces ressources et absorber ces déchets. La comparaison de l'empreinte écologique et de la biocapacité permet d'évaluer si la demande de terres productives et d'eau exercée par les activités humaines est en deçà, égale, ou au delà de la capacité de production et d'absorption de la nature. Les concepts d'empreinte écologique et de biocapacité ont donc été développés dans une

optique d'évaluation globale de la durabilité du développement humain et non pas spécifiquement pour suivre l'impact d'un groupe de personnes ou d'une filière sur la surface d'écosystèmes donnés.

La consommation de ressources naturelles est estimée pour un groupe de consommateurs donnés (en l'occurrence un pays dans l'approche classique de l'empreinte écologique) en faisant un bilan des flux entrants (production interne sur le territoire de ces consommateurs, plus les importations) et des flux sortants (exportations). Le *Global Footprint Network* publie chaque année les comptes nationaux d'empreinte écologique de chaque pays¹ avec le souhait que cet indice soit pris en compte par les décideurs dans leur planification du développement et leurs décisions politiques au même titre que le PIB. Les méthodes pour calculer les empreintes écologiques et les bases de données qui sous-tendent les estimations de ces empreintes font l'objet de mises à jour régulières. La dernière mise à jour par le *Global Footprint Network* date de septembre 2018 mais s'appuie sur des principes de calcul qui n'ont pas varié depuis 2011 (Lin et al., 2018).

Le calcul de l'empreinte écologique tel qu'initialement défini par Wackernagel et Rees et affiné par le *Global Footprint Network* peut être décliné selon le groupe de consommateurs considéré (un pays, mais aussi une ville, une région, un continent...). Diverses grandes villes (Athènes, Barcelone, Calgary, Le Caire, Vancouver, etc.) et régions à travers le monde (par exemple la région méditerranéenne) font ainsi leurs comptes annuels d'empreinte écologique (Global Footprint Network, 2015). Le calcul de l'empreinte écologique peut aussi être décliné selon un secteur d'activité (par exemple le tourisme) ou selon le type de ressources consommées. L'empreinte écologique est ainsi souvent décomposée selon quatre composantes : l'empreinte matières, l'empreinte eau, l'empreinte carbone et l'empreinte sols. Dans cette dernière catégorie figure l'empreinte de la consommation de produits forestiers, définie comme la surface de terres utilisées pour produire les biens et services forestiers destinés à satisfaire la demande d'un pays, indépendamment du pays où ces terres sont utilisées (Arto et al., 2012).

1.2 Empreinte écologique des produits forestiers, empreinte forêt et empreinte déforestation

Sous la même expression d'empreinte forêt (ou « forest footprint » dans la littérature en anglais) figure plusieurs notions distinctes relatives à l'empreinte écologique, l'usage de terres forestières, et la consommation de produits forestiers. La première notion est celle de l'empreinte écologique de la consommation de biens et services forestiers dans un pays donné. Comme spécifié dans le paragraphe précédent, il s'agit d'une empreinte sur les terres, dans le pays où les biens et les services forestiers sont consommés et dans les pays tiers d'où proviennent ces biens et services forestiers. Si on considère que les biens et services forestiers proviennent de forêts ou de terres aujourd'hui non forestières mais qui étaient auparavant des forêts, cette empreinte sur les terres est une empreinte sur des terres forestières. La deuxième notion est celle de l'empreinte écologique de la consommation de ressources naturelles sur les forêts. Si on considère que les terres agricoles ont toutes été gagnées sur la forêt (dans un passé plus ou moins lointain), l'empreinte écologique de la consommation de produits agricoles entre dans cette catégorie.

1. Ces comptes nationaux sont accessibles sur une plateforme en ligne : <http://data.footprintnetwork.org/>

Enfin la troisième notion est celle de l’empreinte de la consommation de ressources naturelles (en particulier les produits agricoles) sur la déforestation, ce qui sous-entend que la temporalité de l’usage forestier des terres est précisée : il existe une date de référence (ou une période d’amortissement) telle que toute utilisation des terres postérieure à cette date est considérée comme une utilisation de terres forestières et toute utilisation antérieure à cette date ne l’est pas. Pour éviter toute confusion entre ces trois notions distinctes, nous réserverons l’utilisation de l’expression « empreinte forêt » à l’empreinte écologique de la consommation de ressources naturelles sur les forêts (sans temporalité). Ces différentes notions sont partiellement emboîtées les unes dans les autres. Plus précisément, l’empreinte forêt ainsi définie englobe l’empreinte écologique des produits forestiers et l’empreinte déforestation (figure 1).

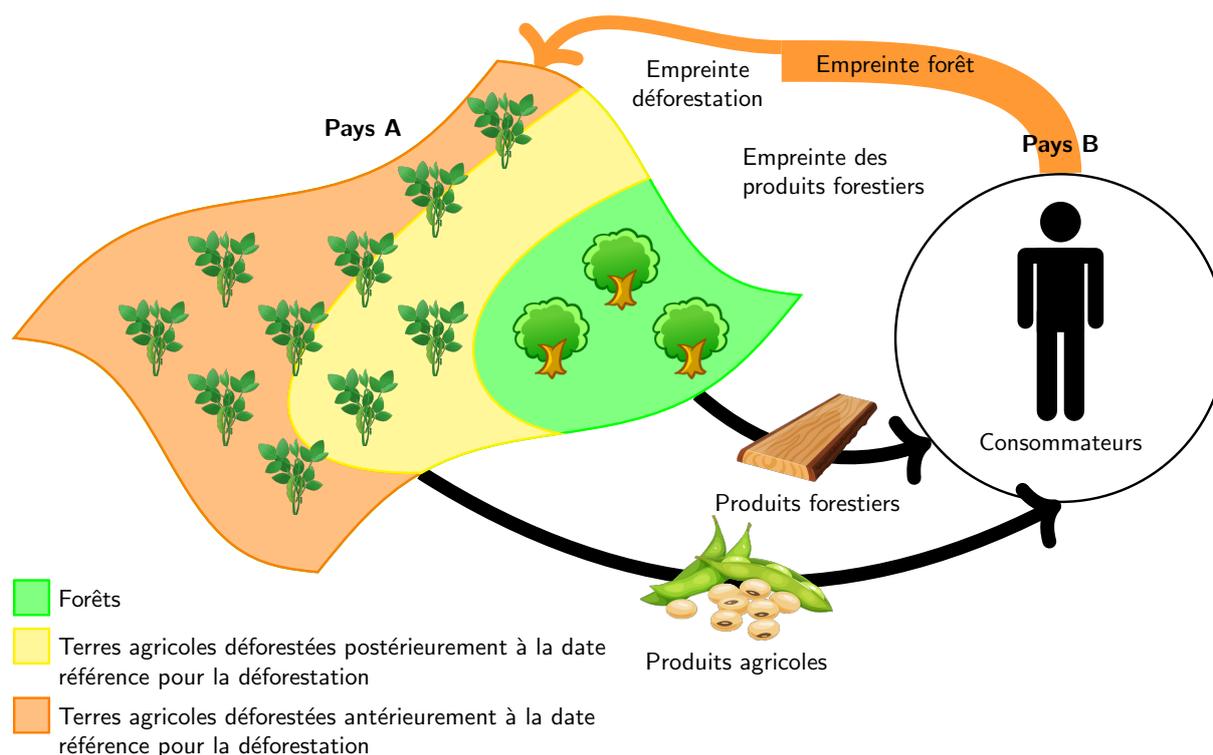


Fig. 1 : Empreinte écologique des produits forestiers, empreinte forêt et empreinte déforestation.

La définition adoptée pour la forêt jouera sur la distinction qui sera faite entre ces différentes notions. Si la définition de la forêt est fondée sur l’usage des terres, alors les produits forestiers proviennent par définition de forêts, et la consommation de ces produits forestiers n’a alors aucune empreinte déforestation. L’exploitation de produits forestiers ne peut être, dans ce cadre, responsable éventuellement que de dégradation forestière. Pour tenir compte de cet impact de la consommation de produits forestiers, il faudrait alors considérer une empreinte sur la dégradation forestière de la consommation de produits forestiers, qui viendrait en complément de l’empreinte déforestation. Si en revanche la définition de la forêt est fondée sur un taux de couverture arborée ou sur tout autre attribut caractérisant la forêt (par exemple son niveau de biodiversité, pour faire la part entre les forêts naturelles et les plantations qui peuvent être équivalentes du point de vue de leur couvert arboré), alors l’exploitation de produits forestiers peut induire de la déforestation. Tout revient finalement à savoir si l’on attribue la déforestation à l’exploitant forestier qui a dégradé la forêt en amenant son taux de cou-

vert arboré en-dessous d'un certain seuil ou en appauvrissant sa biodiversité (même si la terre conserve un usage forestier), ou si l'on attribue la déforestation au premier acteur qui a utilisé la terre pour un usage non forestier. Sans pour autant prendre parti dans ce débat, nous considérons par la suite que la définition de la forêt dépend à la fois de l'usage du sol et d'attributs caractérisant la forêt (taux de couvert arboré, niveau de biodiversité...), selon des modalités qui restent à préciser, ce qui permet de considérer que la consommation de produits forestiers peut avoir une empreinte déforestation.

Le terme « empreinte » est généralement utilisé pour parler de l'impact d'un pays consommateur sur un pays producteur. Il arrive cependant, en particulier dans les approches centrées sur le pays producteur (cf. section suivante), que le terme empreinte soit utilisé pour désigner l'impact interne à un pays producteur de sa production agricole sur son usage des sols. Dans les travaux de Persson et al. (2014*a,b*), l'empreinte déforestation désigne ainsi la quantité de surface déforestée pour produire une tonne d'un produit agricole à l'intérieur d'un pays producteur donné, sans référence à quelque pays consommateur que ce soit.

2 Approches descendantes et approches ascendantes

Le calcul d'une empreinte écologique peut prendre comme point de départ le pays consommateur puis retracer les pays producteurs d'où sont issus les produits consommés dans ce pays consommateur, ou au contraire prendre comme point de départ le pays producteur puis retracer les pays consommateurs vers lesquels les produits du pays producteur sont exportés. En ce qui concerne l'empreinte déforestation, les approches centrées sur les pays producteurs (par exemple Karstensen et al., 2013 ; Persson et al., 2014*a,b* ; Zaks et al., 2009) ont surtout été mises en œuvre dans le contexte du mécanisme REDD+, afin d'identifier les facteurs de déforestation dans un pays souhaitant mettre en œuvre le REDD+ et comprendre le lien entre la déforestation dans ce pays et la demande dans les pays tiers (déforestation exportée). Les approches centrées sur les pays consommateurs (par exemple Cuypers et al., 2013) ont surtout été mises en œuvre par des pays consommateurs qui souhaitaient comprendre l'impact de leur consommation sur la déforestation dans les pays producteurs (déforestation importée).

Les calculs d'empreinte de déforestation nécessitent tout d'abord d'identifier les produits considérés comme responsable de la déforestation. Cette identification n'est pas simple car la déforestation résulte de processus en cascade. Si la conversion d'une forêt en un autre usage est un événement ponctuel dans le temps et dans l'espace, la déforestation en tant que processus inclut

- des transitions entre usages, par exemple une forêt primaire dégradée par l'exploitation forestière dans un premier temps, puis convertie en plantations de palmier à huile dans un second temps, ou bien une forêt convertie en cultures vivrières par des petits agriculteurs dans un premier temps, puis en cultures d'exportation dans un second temps : faut-il considérer que c'est le premier produit de cette succession d'usages qui est responsable de la déforestation, ou le dernier, ou tous ?
- des interactions entre usages, par exemple la conversion d'une culture A en une culture B dans une zone non forestière qui induit la conversion de forêts en culture A dans une zone forestière : faut-il considérer dans cet exemple que c'est le pro-

duit A ou le produit B qui est responsable de la déforestation ?

À ces processus s'ajoutent des questions de temporalité : à partir de quand une terre déforestée peut-elle être considérée comme terre agricole dont l'utilisation n'est plus responsable de déforestation ? Faut-il considérer une date de référence T_0 telle que toute déforestation survenue avant T_0 est considérée comme indépendante de la consommation après T_0 ? Faut-il considérer une période d'amortissement T (par exemple $T = 10$ ans ou 20 ans ; Persson et al., 2014a ; Zaks et al., 2009) telle que toute déforestation survenue au moment t sera considérée comme potentiellement liée à la consommation entre t et $t + T$?

Les approches descendantes partent de la consommation dans les pays consommateurs pour identifier les principaux produits considérés comme responsable de la déforestation, alors que les approches ascendantes partent de la production dans les pays producteurs pour identifier les produits considérés comme responsables de la déforestation. Ces deux approches reviennent à attribuer la responsabilité de la déforestation à des produits différents. Dans leur estimation de l'empreinte déforestation de l'Union européenne, Cuypers et al. (2013) ont suivi une approche descendante. Ils ont ainsi considéré que la canne à sucre, dont la consommation dans l'Union européenne et les surfaces cultivées dans le monde avaient augmenté, était un produit responsable de la déforestation. Ils ont notamment estimé que la canne à sucre était responsable de 17 % de la déforestation au Brésil, alors même que la conversion directe de forêts en cultures de canne à sucre est quasi-inexistante au Brésil (Persson et al., 2014a).

Le calculateur d'empreinte déforestation du WWF France (2018) attribue *a priori* l'essentiel de la déforestation à six matières premières : huile de palme, soja, cacao, caoutchouc naturel, bœuf et cuir, bois d'œuvre, et pâte à papier. Le calculateur d'empreinte déforestation d'Envol Vert (2018) reprend ces six matières premières et considère en outre une septième matière première : le café. Envol Vert mentionne également l'importance de l'extraction des minerais dans la déforestation sans pour autant prendre les minerais en considération dans le calcul d'empreinte. Ce choix des produits considérés comme responsables de la déforestation a une incidence sur l'identification des pays producteurs d'où la France importe de la déforestation. À la différence du WWF et d'Envol Vert, le calculateur de l'UICN suit une approche purement ascendante (sans se référer à quelque pays consommateur que ce soit). Cela amène l'UICN à identifier un ensemble de produits responsables de la déforestation et un ensemble de pays d'où la déforestation est importée assez différents de ceux considérés par le WWF et Envol Vert (par exemple le calculateur de l'UICN identifie le tabac comme produit clé pour la déforestation importée et le Zimbabwe comme pays producteur clé pour la déforestation importée, ce qui échappe complètement aux calculateurs du WWF et d'Envol Vert).

3 Mesure de l'empreinte sols des produits agricoles et forestiers

Il existe deux principales approches pour calculer les empreintes sols de la consommation de produits agricoles et forestiers : l'analyse entrée-sortie (ou intrant-extrant) multirégionale d'une part, et la comptabilité des flux de matières à l'échelle de l'économie d'autre part (O'Brien et al., 2015 ; O'Brien et Bringezu, 2018). La première approche, à savoir l'analyse entrée-sortie, repose sur les relations existantes entre les différents secteurs industriels dans une économie : chaque secteur produit un extrait à partir de

différents intrants fournis par d’autres secteurs, ce qui est résumé dans une matrice indiquant la quantité de chaque intrant nécessaire pour produire une unité d’extrait. L’analyse entrée-sortie multirégionale combine cette connaissance des relations entre secteurs avec la connaissance des échanges commerciaux entre pays. Connaissant ces relations, on peut remonter les chaînes de valeur internationales et ainsi estimer la nature et les quantités de matières premières requises dans un pays A pour produire chaque unité de produit fini consommé dans un pays B (Peters et al., 2011). En mesurant la consommation de produits finis dans le pays B , on en déduit la nature et les quantités de matières premières utilisées dans le pays A pour cette consommation du pays B . Dans le cas du bois par exemple, l’analyse entrée-sortie indique quelle quantité de bois rond (avant toute transformation) d’un pays A est utilisée dans chaque produit fini consommé dans le pays B .

L’analyse entrée-sortie multirégionale a par exemple été utilisée par Weinzettel et al. (2013) pour mesurer l’empreinte sols des pays, par Karstensen et al. (2013) pour relier les émissions de CO_2 dues à la déforestation au Brésil aux consommateurs, par Cuyppers et al. (2013) pour mesurer l’empreinte déforestation de l’Union européenne, ou par Tukker et al. (2014) pour mesurer l’empreinte sols de différents pays et régions à l’échelle mondiale. C’est aussi l’approche retenue par l’UICN pour son calculateur d’empreinte déforestation (Philippe Puydarrieux et Damien Mitterpergher, communication personnelle).

La seconde approche, à savoir la comptabilité des flux de matières à l’échelle de l’économie, repose sur une analyse des flux entrants (importations), des flux de production interne et des flux sortants (exportations) d’une matière donnée, qu’elle soit sous une forme brute ou transformée. Dans le cas du bois par exemple, il s’agira de comptabiliser toutes les importations, les exportations et la production interne de bois sous toutes ses formes (bois rond, produits bois de première transformation, produits bois de seconde transformation, etc.) dans un pays donné. En faisant le bilan des flux entrants, de la production interne et des flux sortants, on en déduit la consommation de la matière sous toutes ses formes dans le pays sujet.

La comptabilité des flux de matières a par exemple été utilisée par O’Brien et Bringezu (2018) pour calculer l’empreinte sols globale du bois consommé par l’Union européenne. C’est aussi l’approche retenue par le WWF pour son calculateur d’empreinte déforestation (Jennings et de Korte, 2018; WWF France, 2018).

Même si des efforts sont encore nécessaires pour les améliorer et que des contradictions fortes ressortent parfois des analyses (Kastner et al., 2014), ces deux approches tendent à donner des estimations convergentes de l’empreinte sols de la consommation des produits agricoles et forestiers (Bruckner et al., 2015; O’Brien et Bringezu, 2018). Nous revenons plus en détails dans sections 3.1 et 3.3 sur ces deux approches. Une troisième approche, plus grossière, consiste à calculer l’empreinte sols directement à partir d’estimations de la consommation des pays. C’est notamment l’approche suivie par Envol Vert pour son calculateur d’empreinte déforestation (Envol Vert, 2018). Nous précisons cette dernière approche dans la section 3.2.

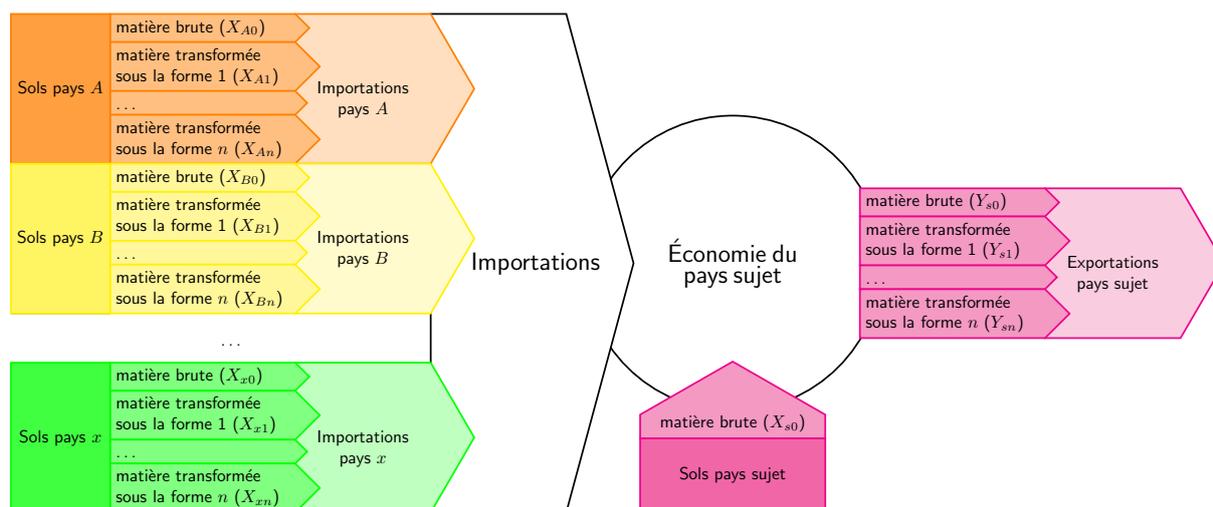


Fig. 2 : Flux de matières brutes et transformées entrant dans l'économie d'un pays sujet à partir de son propre sol ou à partir du sol de pays tiers (importations) et flux de matières brutes et transformées sortant de l'économie du pays sujet par les exportations.

3.1 Mesure de l'empreinte sols par comptabilité des flux de matière

On considère une matière donnée (bois, hévéa, soja, bœuf. . .) et les différentes formes qu'elle peut prendre quand elle est transformée par l'économie. Le processus économique de transformation peut correspondre à une transformation physique de la matière (sciage de bois rond en planches, par exemple), mais aussi à une transformation chimique ou biologique (ce qui est souvent le cas avec des produits agricoles). Des volailles nourries avec du tourteau de soja devront par exemple être considérées comme une forme transformée du soja et les flux de ces volailles devront être pris en compte dans la comptabilité des flux de soja. Jennings et de Korte (2018) établissent une distinction entre les matières premières transformées (par exemple du caoutchouc naturel dans des pneus de voiture ou du bois dans une table de jardin) et les matières premières intégrées (par exemple du tourteau de soja utilisé pour nourrir des volailles), mais le calcul reste le même dans ces deux cas de figure.

Soit n le nombre de formes transformées existantes pour la matière considérée. On s'intéresse à un pays sujet (noté s) dont on veut mesurer l'empreinte sols du fait de l'utilisation par son économie de cette matière. Soit X_{x0} la quantité de matière brute importée chaque année par le pays sujet depuis le pays x et soit X_{s0} la quantité de matière brute produite chaque année par les sols du pays sujet lui-même (production interne) (figure 2). Soit X_{xi} la quantité de matière sous la i^{e} forme transformée importée chaque année par le pays sujet depuis le pays x . Soit enfin Y_{s0} la quantité de matière brute exportée chaque année par le pays sujet et Y_{si} la quantité de matière exportée chaque année sous sa i^{e} forme transformée. Le bilan annuel des flux entrant et sortant de l'économie du pays sujet pour la matière sous sa i^{e} forme transformée est donc : $\sum_x X_{xi} - Y_{si}$, tandis que pour la matière brute, ce bilan est : $X_{s0} + \sum_x X_{x0} - Y_{s0}$. Si on fait abstraction des stocks, ce bilan annuel correspond à la matière consommée annuellement sous chacune de ses formes dans le pays sujet.

La transformation de la matière peut induire des pertes de cette matière (transformation de bois rond en planches, par exemple) ou des mélanges avec d’autres matériaux (transformation du latex d’hévéa en pneus, par exemple). Pour ramener les quantités sous les différentes formes transformées à une base commune, on utilise un coefficient de transformation C_i qui indique la quantité de matière brute nécessaire pour obtenir une unité de matière dans sa i^e forme transformée. Le bilan des flux de matière exprimé en unités de matière brute devient donc : $\sum_x C_i X_{xi} - C_i Y_{si}$ pour la i^e forme transformée, tandis que ce bilan ne change pas pour la matière brute. Enfin, pour convertir la quantité de matière brute en surface de sol utilisé, on utilise la productivité du sol, c’est-à-dire la quantité de matière brute produite par hectare et par an par un sol dévolu à la production de cette matière. Cette productivité est propre à chaque pays et est donc dénotée P_x pour le pays x . L’empreinte sols (en hectares) liée à la consommation sous toutes ses formes de la matière considérée par le pays sujet est au final :

$$E = \frac{X_{s0}}{P_s} + \sum_x \frac{X_{x0}}{P_x} - \frac{Y_{s0}}{P_s} + \sum_{i=1}^n \sum_x \frac{C_i X_{xi}}{P_x} - \frac{C_i Y_{si}}{P_s} \quad (1)$$

Ce calcul nécessite donc de connaître : (i) les flux d’import et d’export de la matière sous chacune de ses formes transformées ; ces données sont accessibles pour les principaux produits forestiers et agricoles dans des bases de données internationales telles que FAOSTAT ou Comtrade ; (ii) les coefficients de transformation de la matière ; (iii) la productivité des sols de chaque pays pour la production de cette matière. Ces paramètres peuvent être connus plus ou moins précisément à partir de bases de données internationales, de rapports des pays ou de la littérature scientifique.

Une limite du calcul précédemment présenté concerne les flux de matière importée depuis un pays A dans un pays B , transformée dans ce pays B , puis exportée dans le pays sujet où elle est consommée. Avec le schéma de calcul présenté précédemment, l’empreinte sols de cette consommation du pays sujet sera attribuée au pays B et la productivité utilisée pour convertir la matière en surface de sols sera celle du pays B , alors qu’en réalité l’empreinte sols a lieu dans le pays A et c’est la productivité du pays A qu’il aurait fallu utiliser. Rien n’empêche dans les calculs théoriques de retracer les flux d’import-export entre les différents pays pour étendre le calcul au cas où la transformation a lieu dans un pays différent du pays producteur de la matière brute et du pays sujet. En pratique, les bases de données disponibles sur les flux d’import-export n’assurent pas cette traçabilité à l’intérieur des économies des pays : on sait ce qui rentre et ce qui sort des pays, mais on ne sait pas quel flux entrant est connecté à quel flux sortant à l’intérieur des pays. Cette limite dans les données disponibles peut être partiellement levée en faisant l’hypothèse que chaque flux sortant d’un pays A se distribue entre les différents pays d’importation du pays A et le pays A lui-même dans les mêmes proportions que les flux entrant dans le pays A . Par exemple, si un pays A importe du bois rond d’un pays B et d’un pays C et produit lui-même du bois rond dans les proportions $2/6^e$, $3/6^e$ et $1/6^e$, alors on fera l’hypothèse que les produits bois de première transformation exporté par le pays A vers un pays D utilise du bois d’origine du pays B pour $2/6^e$ de ces exportations, du pays C pour $3/6^e$ des exportations et du pays A pour $1/6^e$ des exportations. Le calculateur d’empreinte du WWF procède de cette façon pour attribuer les flux de matière à leur pays producteur d’origine (Jennings et de Korte, 2018 ; WWF France, 2018).

3.2 Mesure de l’empreinte sols directement à partir de la consommation

Plutôt que de calculer la consommation d’un pays en faisant le bilan de sa production interne, de ses importations et de ses exportations, une estimation directe de la consommation du pays peut être le point de départ du calcul de l’empreinte sols. Soit n le nombre de formes que peut prendre une matière donnée quand elle est consommée sous forme de produit fini et Q_i la quantité de ce produit fini consommée chaque année dans le pays sujet. Comme précédemment, pour pouvoir se ramener à une base de comparaison commune, on utilise un coefficient de transformation C_i qui indique la quantité de matière première nécessaire pour obtenir une unité du produit fini sous sa i^e forme. L’empreinte sols (en hectares) liée à la consommation sous toutes ses formes de la matière considérée par le pays sujet est :

$$E = \sum_{i=1}^n \frac{C_i Q_i}{P} \quad (2)$$

où P est la productivité moyenne des sols, c’est-à-dire la quantité de matière première produite en moyenne par hectare et par an par un sol utilisé pour la production de cette matière.

Ce calcul nécessite de connaître comme précédemment les coefficients de transformation de la matière brute en produits finis. Les données sur la consommation des pays sont extraites de bases de données nationales ou internationales. Envol Vert utilise par exemple les données de l’ADEME et la base de données Agreste du Ministère français de l’agriculture et de l’alimentation pour connaître la consommation française de produits finis issus du bois ; la base de données du CÉRÉOPA pour la consommation française de produits finis issus du soja ; etc.

Cette approche est plus grossière que l’approche par comptabilité des flux de matière puisqu’elle ne reconstitue aucun flux d’échange entre pays. Elle ne permet donc pas de décliner l’empreinte sols d’un pays consommateur selon les différents pays producteurs. Elle ne permet pas non plus d’ajuster les paramètres de productivité par pays, alors même que la productivité d’une même matière peut fortement varier d’un pays producteur à l’autre selon sa technologie de production et sa situation climatique.

3.3 Mesure de l’empreinte sols par analyse entrée-sortie multirégionale

À la différence de l’approche par comptabilité des flux de matière, l’analyse entrée-sortie tient compte de l’interdépendance entre les différents secteurs de l’économie. L’économie mondiale est décomposée en n produits (ou groupes de produits au sein d’un même secteur économique) et q régions géographiques. Soit X_i^k la quantité du i^e produit ($i = 1, \dots, n$) produite dans la k^e région du monde ($k = 1, \dots, q$) pour satisfaire la demande de l’économie mondiale. Dans un contexte de déforestation importée, les n produits devront inclure les produits agricoles responsables de la déforestation ainsi que tous les produits qui utilisent ces produits responsables de la déforestation pour leur propre production. Par exemple, pour calculer l’empreinte du soja avec cette approche, il faudra inclure les volailles dans les n produits pris en compte puisque la production de volailles consomme du soja. Soit F_i^k la demande finale du produit i dans la

région k , c’est-à-dire la quantité du produit i qui est achetée par des consommateurs de la région k qui ne produisent aucun extrant repartant dans l’économie. Il s’agit par exemple de la quantité de volaille consommée pour son alimentation par la population d’un pays donné, ou de la quantité de soja directement consommée pour son alimentation par la population d’un pays donné. En revanche la quantité de soja consommée pour l’élevage de volaille dans le pays ne fait pas partie de cette demande finale puisque la volaille d’élevage repart comme produit dans l’économie. Soit a_{ij}^{kl} la quantité du produit i issue de la région k nécessaire pour produire une unité du produit j dans la région l . Par exemple, ce coefficient pourra représenter la quantité de soja brésilien nécessaire pour produire une unité de volaille en France. Les coefficients a_{ij}^{kl} sont le plus souvent exprimés en termes de flux monétaires entre pays, c’est-à-dire, pour poursuivre l’exemple précédent, le montant de soja brésilien exprimé en dollars nécessaire pour produire l’équivalent d’un dollar de volaille en France. L’unité des coefficients a_{ij}^{kl} est alors le dollar par dollar.

La quantité (exprimée en dollars) de produits i issue de la région k nécessaire pour l’ensemble de la production de l’économie de la région $l \neq k$ est ainsi : $a_{i1}^{kl}X_1^l + a_{i2}^{kl}X_2^l + \dots + a_{in}^{kl}X_n^l$. Lorsque $l = k$, il faut en outre ajouter la demande finale F_i^k du produit i dans la région k , soit $a_{i1}^{kk}X_1^k + a_{i2}^{kk}X_2^k + \dots + a_{in}^{kk}X_n^k + F_i^k$. En additionnant toutes ces contributions, on retrouve la quantité X_i^k du produit i issue de la région k nécessaire pour l’ensemble de la production et de la consommation mondiales, c’est-à-dire :

$$X_i^k = \sum_{l=1}^q (a_{i1}^{kl}X_1^l + a_{i2}^{kl}X_2^l + \dots + a_{in}^{kl}X_n^l) + F_i^k$$

En notant \mathbf{X}^k le vecteur $[X_1^k, \dots, X_n^k]$ et \mathbf{F}^k le vecteur $[F_1^k, \dots, F_n^k]$, cela revient à écrire : $\mathbf{X}^k = \sum_{l=1}^q \mathbf{A}^{kl}\mathbf{X}^l + \mathbf{F}^k$ où \mathbf{A}^{kl} est la matrice à n lignes et n colonnes :

$$\mathbf{A}^{kl} = \begin{bmatrix} a_{11}^{kl} & \dots & a_{1n}^{kl} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1}^{kl} & \dots & a_{nn}^{kl} \end{bmatrix}$$

De manière encore plus compacte, on peut écrire :

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{F} \quad (3)$$

où $\mathbf{X} = [\mathbf{X}^1, \dots, \mathbf{X}^q]$, $\mathbf{F} = [\mathbf{F}^1, \dots, \mathbf{F}^q]$ et \mathbf{A} est une matrice à nq lignes et nq colonnes qui résume toutes les interdépendances entre les productions de tous les produits dans toutes les régions du monde :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^{11} & \dots & \mathbf{A}^{1q} \\ \vdots & & \vdots \\ \mathbf{A}^{q1} & \dots & \mathbf{A}^{qq} \end{bmatrix}$$

On déduit finalement de l’équation (3) les quantités produites de chaque produit i dans chaque région k du monde pour satisfaire la demande mondiale :

$$\mathbf{X} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{F} \quad (4)$$

où \mathbf{I} est la matrice identité de dimension nq .

Dans sa forme la plus générale, la matrice \mathbf{A} est appelée une matrice d’entrées-sorties interrégionales. Elle permet de cartographier les flux monétaires entre les différents secteurs économiques et les différentes régions du monde. Pour peu que les différents secteurs de l’économie mondiale soient un peu détaillés et que les différentes régions du monde le soient aussi, renseigner la matrice \mathbf{A} requiert une quantité phénoménale de données qu’il est en pratique impossible de rassembler. Des hypothèses simplificatrices sur la structure de la matrice \mathbf{A} sont donc faites pour limiter la quantité de coefficients à estimer. On parle alors de matrice d’entrées-sorties multirégionales, l’approche la plus souvent suivie pour simplifier la structure de la matrice \mathbf{A} étant celle de Chenery-Moses (Miller et Blair, 2009).

Une fois les quantités de produits qui satisfont la demande mondiale calculées grâce à l’équation (4), ces quantités sont converties comme dans l’approche par comptabilité des flux de matière en empreinte sol grâce à la productivité des sols de chaque pays (Weinzettel et al., 2011, 2013 ; Galli et al., 2013). La matrice \mathbf{A} des entrées-sorties multirégionales permet de cartographier les pays (ou régions) d’origine où cette empreinte est localisée et les pays consommateurs où la demande finale est localisée.

Un élément clé pour le calcul de l’empreinte sols par analyse entrée-sortie multirégionale est donc la disponibilité de la matrice \mathbf{A} des entrées-sorties. Différentes tables sont disponibles, qui diffèrent par le niveau de détail des secteurs économiques et le niveau de détail des pays ou régions qu’elles considèrent (Marques et al., 2017). La table EORA², la table EXIOBASE³ et la table GTAB⁴ sont fréquemment utilisées pour les calculs d’empreinte écologique. Dans le cas de la déforestation importée, une difficulté avec les tables existantes est qu’elles sont davantage détaillées pour les secteurs économiques et les pays qui ont les économies les plus développées, alors que la déforestation importée concerne principalement les pays avec les économies les moins développées qui sont moins bien décrits dans les tables (Philippe Puydarrieux, communication personnelle). Le calculateur d’empreinte déforestation de l’UICN utilise la table EORA.

3.4 Produits pris en compte dans le calcul des empreintes sols

Une matière comme le bois peut avoir plusieurs milliers d’utilisations si on entre dans le détail de chaque produit transformé. En pratique il faut simplifier et regrouper les produits transformés dans un certain nombre de catégories plus ou moins détaillées. Les analyses par comptabilité des flux de matière permettent de décrire finement les produits et filières. La figure 3 montre par exemple l’ensemble des 35 produits transformés du bois (et leurs connexions dans les processus de transformation) pris en compte par O’Brien et Bringezu (2018) pour calculer l’empreinte sols du bois consommé par l’Union européenne. Le calculateur d’empreinte du WWF repose sur une description fine des différents produits transformés : il distingue 56 produits issus du bois (y compris les produits issus de la pâte à papier), 11 produits issus du cacao, 19 produits issus du palmier à huile, 57 produits issus du soja, 32 produits issus du caoutchouc naturel, et 27 produits issus du bœuf (y compris ceux issus du cuir). Ces différents produits correspondent à des codes dans le Système harmonisé de désignation et de codification

2. <https://worldmrio.com/>

3. <https://www.exiobase.eu/>

4. <https://www.gtap.agecon.purdue.edu/>

des marchandises de l'Organisation mondiale des douanes, ce qui facilite l'identification des flux d'import-export entre pays. Le rapport d'Envol Vert (2018) ne détaille pas la liste des produits transformés utilisés pour les calculs, mais présente des catégories de produits plus agrégées avec 4 produits issus du bois, 1 seul produit issu du cacao, 3 produits issus du palmier à huile, 6 produits issus du soja, 1 seul produit issu du caoutchouc naturel, et 4 produits issus du bœuf (cuir compris).

Les analyses entrée-sortie multirégionales reposent généralement sur une description beaucoup moins fine des produits et des filières puisque les tables d'entrées-sorties multirégionales considèrent l'économie mondiale dans son ensemble, ce qui nécessite d'agréger les secteurs économiques. Les tables d'entrées-sorties multirégionales existantes présentent en fin de compte un compromis entre l'agrégation des secteurs économiques et leur couverture géographique : les tables couvrant le plus de pays décrivent généralement l'économie mondiale en quelques secteurs agrégés (l'agriculture, l'énergie, le transport...) tandis que les tables qui détaillent les secteurs de l'économie sont généralement limitées à quelques pays ou régions (généralement ceux ayant les économies les plus développées).

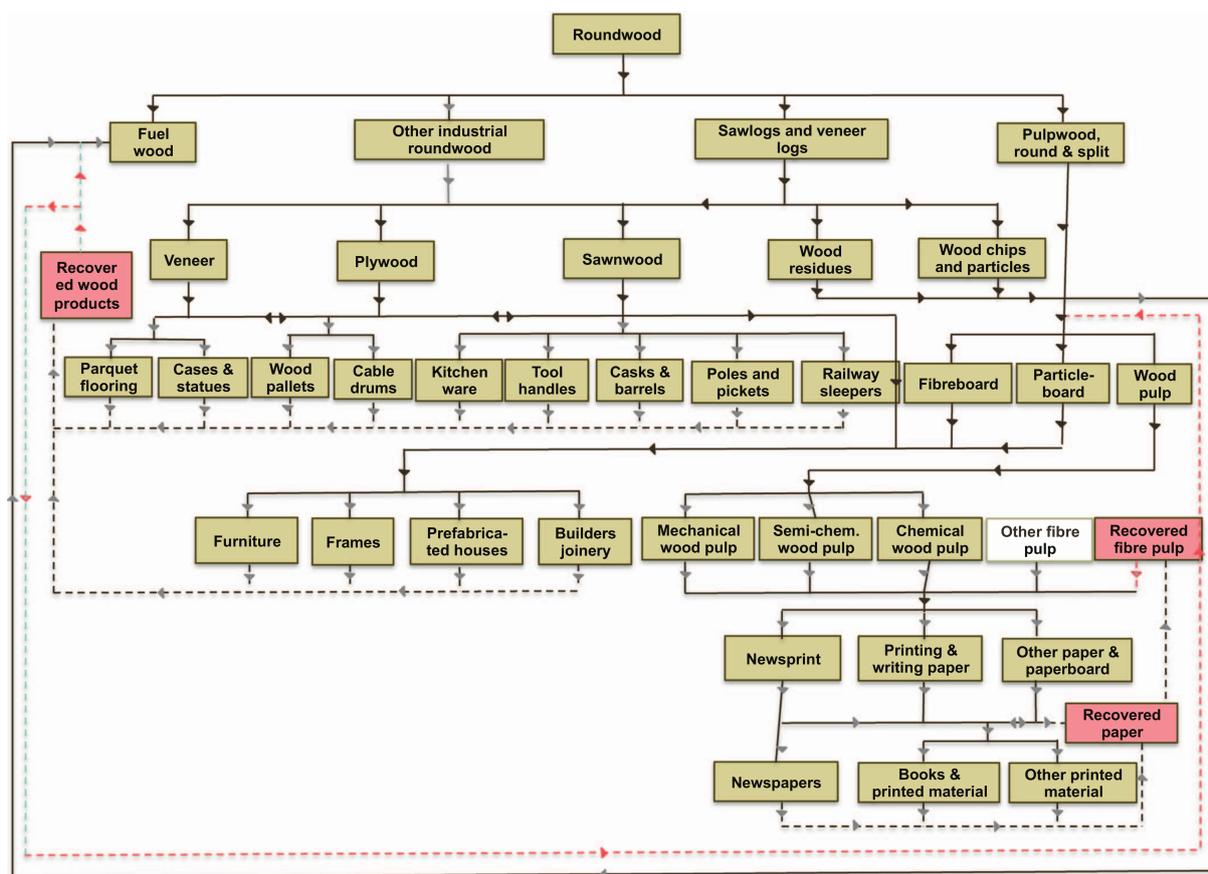


Fig. 3 : Produits transformés du bois pris en compte par O'Brien et Bringezu (2018) pour le calcul de l'empreinte sols globale de la consommation de bois par l'Union européenne.

4 De l’empreinte forêt à l’empreinte déforestation

Comme mentionné dans la section 1.2, l’empreinte sols (ou empreinte forêt si on considère que les sols agricoles proviennent tous de forêts dans un passé plus ou moins lointain) est plus vaste que l’empreinte déforestation qui ne concerne que la fraction des sols récemment déforestés pour répondre à la demande du pays consommateur. La déforestation et la dégradation forestière sont des phénomènes localisés géographiquement. La télédétection permet désormais de suivre et de cartographier la déforestation avec une fiabilité acceptable (Potapov et al., 2020) tandis que les progrès obtenus avec l’imagerie haute résolution (Sentinel-2 en particulier) et de nouvelles techniques d’analyse (analyse de la structure de la canopée, par exemple) laissent espérer qu’il en sera de même pour la dégradation forestière dans un futur raisonnablement proche. Si on pouvait affiner la comptabilité des flux de matière à une échelle infranationale et localiser géographiquement les flux entrant et sortant de matière, on pourrait déterminer si les flux correspondant à la production des matières premières proviennent de zones déforestées, et donc calculer une empreinte déforestation « réelle ». Une telle approche de calcul nécessiterait un système de traçabilité des produits qui malheureusement n’existe pas à l’échelle mondiale et qui a peu de chances d’exister à échéance raisonnable. Il faut donc procéder de manière indirecte ou bien faire des hypothèses sur la distribution géographique des flux.

4.1 Empreinte forêt corrigée par un facteur de risque de déforestation

La méthode la plus simple pour passer de l’empreinte forêt à l’empreinte déforestation ne requiert aucune cartographie de la déforestation. Elle consiste à calculer l’empreinte sols (comme décrit dans la section 3) et à estimer séparément un facteur de risque de déforestation. L’empreinte déforestation est alors simplement l’empreinte sols corrigée par le facteur risque de déforestation. Les calculateurs d’empreinte déforestation du WWF France (2018) et d’Envol Vert (2018) reposent sur ce calcul simple. Ce calcul ignore les dimensions spatiales et temporelles de la déforestation. Le WWF et Envol Vert procèdent différemment pour faire l’analyse de risque de déforestation : WWF mène l’analyse de risque par pays producteur sans faire de différence entre les filières, alors qu’Envol Vert mène au contraire l’analyse de risque par filière sans faire de différence entre les pays producteurs.

L’analyse de risque de déforestation du WWF repose sur quatre critères qui décrivent chaque pays producteur :

1. Perte de couverture arborée : superficie de couvert forestier perdue par le pays entre 2012 et 2016 ; cet indicateur est renseigné par la plateforme *Global Forest Watch* ;
2. Taux de déforestation : variation en pourcentage de la surface de forêts naturelles entre 2010 et 2015 ; cet indicateur est renseigné par les données du FRA de la FAO ;
3. Droits du travail : indice de la Confédération syndicale internationale (acronyme anglais : ITUC) sur les normes du travail, fondé sur les violations des droits des travailleurs signalées et publiées en 2017 ;

4. Perception de la corruption : indice de *Transparence Internationale* sur les niveaux de corruption perçus dans le secteur public, publié en 2017.

Les deux premiers de ces critères renseignent la déforestation à l’échelle du pays tandis que les deux suivants renseignent le risque social du pays. Pour chaque pays et chaque critère, une note comprise entre 1 (tranche de valeurs les plus basses du critère) et 3 (tranche de valeurs les plus hautes du critère) a été calculé. Les notes ont ensuite été additionnées pour chaque pays, donnant une note totale comprise entre 4 (risque de déforestation le plus faible, lorsque le pays est dans la classe de valeurs la plus basse pour chacun des critères) et 12 (risque de déforestation le plus élevé). Les pays ayant une note totale supérieure ou égale à 9 sont considérés comme pays à risque élevé de déforestation. Comme l’empreinte sols est calculée comme une somme sur les pays producteurs (cf. équation 1), on peut la décomposer en deux contributions : l’empreinte sols dans les pays producteurs à risque élevé de déforestation, et l’empreinte sols dans les pays producteurs où le risque de déforestation n’est pas élevé. La première de ces contributions correspond à l’empreinte déforestation.

Puisque le calculateur d’empreinte sols d’Envol Vert ne distingue pas les pays producteurs, son analyse de risque de déforestation ne peut pas être menée au niveau des pays. L’analyse est donc faite au niveau de chaque filière à l’échelle mondiale. Elle repose sur 8 critères regroupés en trois catégories :

- Risque que la matière première soit un facteur de déforestation :
 1. Déforestation exportée (noté sur 30) : taux de déforestation importée dans les exportations des principaux pays de production des matières premières concernées calculés par Persson et al. (2014a) ;
 2. Vecteur de déforestation (noté sur 10) : niveau de responsabilité de la production de la matière première concernée comme vecteur de déforestation au niveau global ;
 3. Vecteur de dégradation (noté sur 10) : niveau de responsabilité de la production de la matière première concernée comme vecteur de dégradation forestière au niveau global ;
- Risque de dépendance :
 4. Part des importations (noté sur 10) : part des importations représente la part de la matière première concrètement importée en France ;
 5. Risque des importations (noté sur 15) : proportion des pays producteurs de la matière première étant définis comme à risque de déforestation selon le WWF France (2018) ;
- Risque de non durabilité :
 6. Niveau d’illégalité de la matière première importée (noté sur 10) : estimation du niveau de légalité de la matière première importée selon Nepcon ;
 7. Non durabilité (noté sur 10) : part sectorielle de la matière première étant non certifiée ;
 8. Alternatives (noté sur 5) : possibilité d’avoir des alternatives dans le marché à cette matière première à risque.

À noter que le critère 5 pris en compte par Envol Vert est issu de l’analyse de risque du WWF. La somme de ces 8 critères fournit donc pour chaque filière une note de risque

sur 100. L’empreinte déforestation est calculée pour chaque matière par son empreinte sols (cf. équation 2) multipliée par la note de risque de déforestation et divisée par 100.

L’analyse de risque d’Envol Vert repose sur davantage de critères que celle du WWF. Cependant elle interprète le risque de déforestation comme une proportion de terres touchées par la déforestation alors même que ce risque est un indice composite qui agrège diverses informations de natures très différentes. Le choix des critères retenus peut finalement paraître arbitraire. L’analyse de risque du WWF n’échappe pas à cette part d’arbitraire mais le WWF a au moins la prudence d’interpréter les scores de risque de manière qualitative (classes de risque).

Comparaison des mesures d’empreinte du WWF et d’Envol Vert. WWF France (2018) et Envol Vert (2018) donnent des estimations du risque de déforestation pour sept produits agricoles et forestiers consommés par la France qui sont cohérentes, même si Envol Vert surestime presque systématiquement le risque de déforestation comparé au WWF (figure 4c). En revanche leurs estimations de l’empreinte sols (figure 4a) et de l’empreinte déforestation (figure 4b) sont relativement peu cohérentes. Le WWF estime une empreinte sols qui est souvent plus du double de celle estimée par Envol Vert. Le risque de déforestation qui est plus élevé chez Envol Vert compense partiellement cet écart, mais le total sur les sept produits de l’empreinte déforestation de la France telle qu’estimée par le WWF (5,1 Mha) reste toujours plus du double de celui estimé par Envol Vert (2,2 Mha). L’écart provient donc essentiellement des méthodes différentes utilisées par le WWF et Envol Vert pour calculer l’empreinte sols.

4.2 Empreinte déforestation fondée sur les statistiques de déforestation

Sans aller jusqu’à exploiter des données de télédétection pour cartographier la déforestation, des statistiques forestières nationales sur la déforestation telles que celles fournies par la FAO ou *Global Forest Watch* peuvent être utilisées pour convertir une empreinte sols en empreinte déforestation. Le calculateur d’empreinte déforestation de l’UICN repose ainsi sur les statistiques de déforestation par pays fournies par la FAO dans le cadre de l’évaluation des ressources forestières mondiales (FRA). Les surfaces déforestées dans chaque pays sur une période de référence sont attribuées à des cultures grâce à une clé de répartition construite à partir de données de la littérature scientifique (Philippe Puydarrieux et Damien Mittempergher, communication personnelle).

4.3 Comment tirer parti d’informations cartographiques pour calculer l’empreinte déforestation ?

S’il existait un système de traçabilité des produits permettant de cartographier les flux de matières premières à la même échelle que les cartes de déforestation issue de la télédétection, on pourrait cartographier l’empreinte déforestation. En pratique, les flux de matières premières ne sont connus qu’à l’échelle nationale, ou au mieux à une échelle infranationale telle que la province ou la région. Pour tirer parti des informations cartographiques fournies par la télédétection pour le calcul de l’empreinte déforestation,

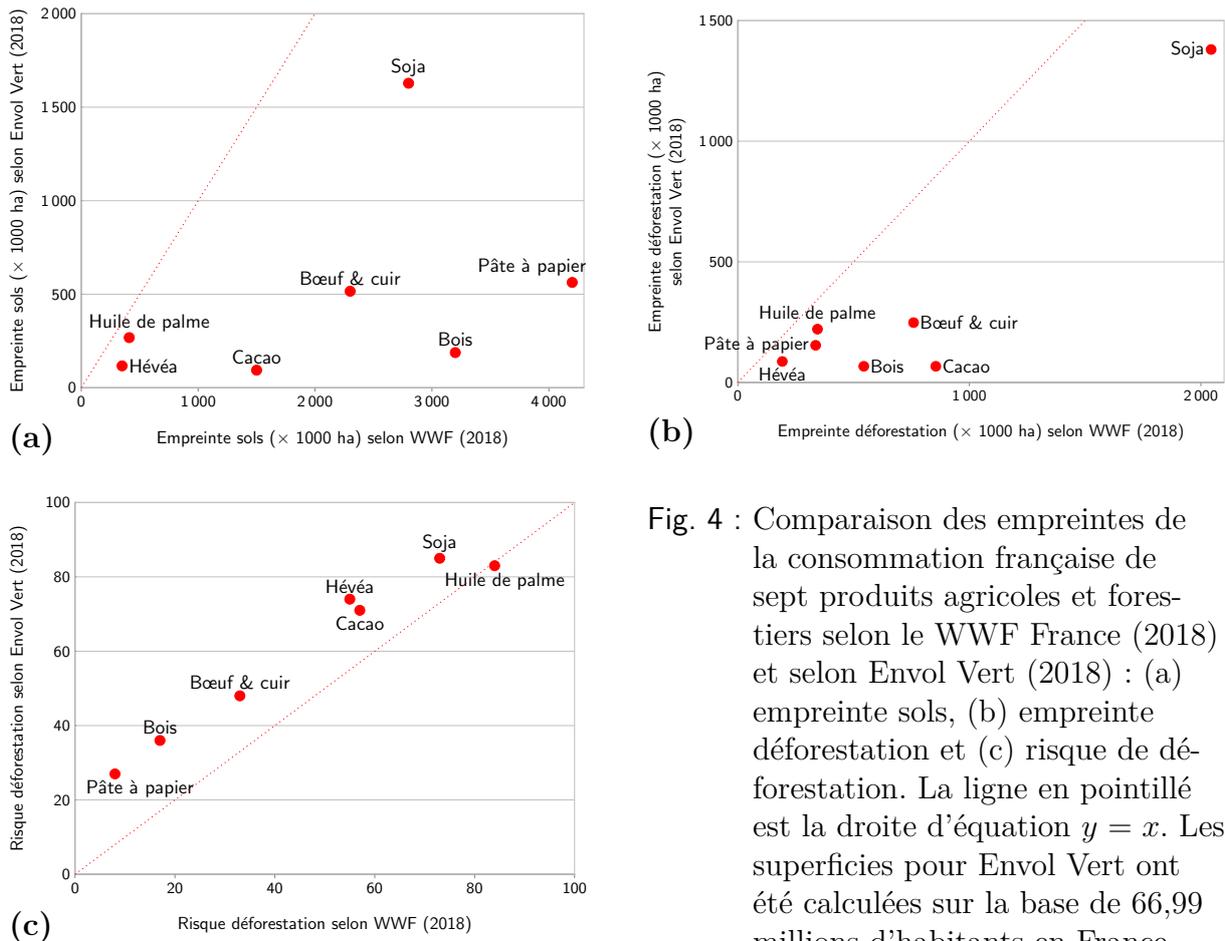


Fig. 4 : Comparaison des empreintes de la consommation française de sept produits agricoles et forestiers selon le WWF France (2018) et selon Envol Vert (2018) : (a) empreinte sols, (b) empreinte déforestation et (c) risque de déforestation. La ligne en pointillé est la droite d’équation $y = x$. Les superficies pour Envol Vert ont été calculées sur la base de 66,99 millions d’habitants en France.

il faut donc faire des hypothèses sur la distribution géographique des flux de matières premières. L’hypothèse la plus simple consiste à supposer que les flux de matières premières ont une distribution uniforme sur l’ensemble des terres agricoles du pays producteur. Si z est la fraction des terres cultivées du pays producteur issues de la déforestation à l’année considérée (i.e. le ratio de la superficie déforestée sur la superficies des terres cultivées), alors l’empreinte déforestation est : $z \times E$, où E est l’empreinte sols. Ce raisonnement est cependant simpliste car il ne tient compte ni des différences d’allocations des terres déforestées aux différentes cultures, ni de la succession de ces cultures sur les terres déforestées, ni de la temporalité de la déforestation. En particulier, avec ce calcul simpliste, un produit exporté aura une empreinte déforestation même si en réalité il n’induit pas de déforestation. La télédétection permet aujourd’hui de suivre les usages successifs des sols et leur chronologie, ce qui permet de faire des hypothèses moins grossières pour le calcul de l’empreinte déforestation.

Plutôt que de calculer une fraction z qui est la même pour tous les produits exportés, on peut calculer une fraction z_j qui est spécifique à chaque produit j en fonction de son incidence sur la déforestation. C’est l’approche suivie par Persson et al. (2014a) qui utilisent des données de télédétection pour estimer la superficie A_τ déforestée à l’année τ , ainsi que la proportion $p_{\tau,t,j}$ de cette superficie déforestée à l’année τ allouée à la production du produit j à l’année t (avec $t \geq \tau$) (figure 5). En notant n le nombre de produits qui contribuent à la déforestation, $\sum_{j=1}^n p_{\tau,t,j} = 1$. Pour tenir compte de la temporalité de la déforestation et de la succession des cultures sur une parcelle déforestée, ils utilisent une fenêtre de lissage de $T = 10$ ans. Si P_j est la productivité du produit

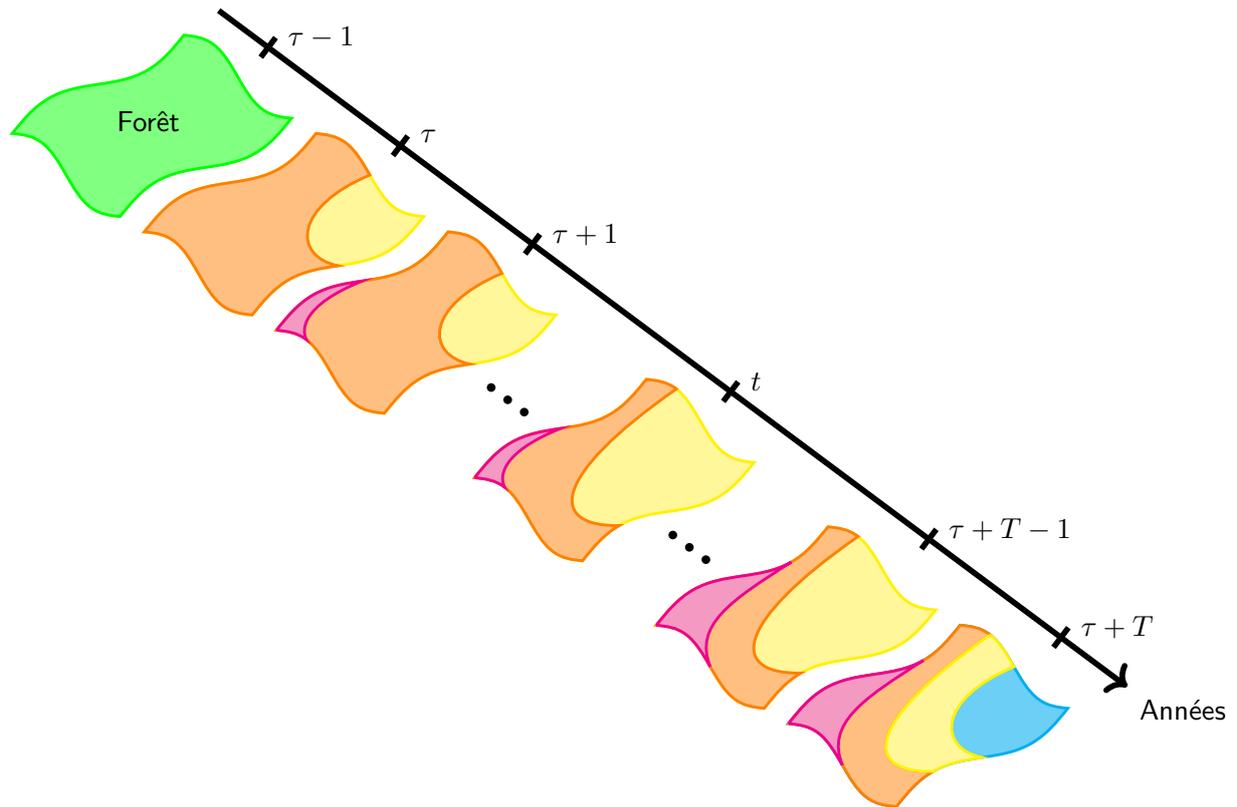


Fig. 5 : Une zone couverte de forêts à l'année $\tau - 1$ est déforestée à l'année τ pour produire deux cultures : la culture « jaune » et la culture « orange ». Une troisième culture « magenta » se substitue à une partie de la culture « orange » l'année suivante. La surface initialement déforestée allouée à chaque culture évolue au cours du temps, jusqu'à l'année $\tau + T - 1$ qui marque la fin de la période d'amortissement de la déforestation. Les cultures « jaune », « orange » et « magenta » sont considérées responsables de la déforestation alors que la culture « bleue » qui apparaît à l'année $t + T$ (après la période d'amortissement) n'est pas considérée comme une culture responsable de la déforestation.

j (i.e. le nombre de tonnes de produit j produite par hectare et par an), la quantité de produit j obtenue sur la superficie déforestée à l'année τ pendant les 10 ans suivant sa déforestation est : $\sum_{t=\tau}^{\tau+T-1} p_{\tau,t,j} A_{\tau} P_j$, soit une productivité en moyenne sur ces 10 années (en tonne $\text{ha}^{-1} \text{an}^{-1}$) égale à :

$$\bar{P}_{\tau,j} = \frac{1}{T} \sum_{t=\tau}^{\tau+T-1} p_{\tau,t,j} P_j$$

$\bar{P}_{\tau,j}$ représente donc la productivité du produit j sur les terres déforestées à l'année τ , sachant que la déforestation induit une succession de cultures et que le produit j n'est que partiellement cultivés sur ces terres déforestées à l'année τ pendant les 10 années suivant l'année τ . La part du flux de matières j exportée vers le pays consommateur à l'année t attribuée à la déforestation est calculée comme la proportion $z_{t,j}$ à l'année t du produit j provenant de terres déforestées. Cette proportion est à nouveau calculée en utilisant une fenêtre de lissage de $T = 10$ ans, soit :

$$z_{t,j} = \frac{\sum_{\tau=t-T+1}^t \bar{P}_{\tau,j} A_{\tau}}{\sum_{\tau=t-T+1}^t Q_{\tau}}$$

où Q_t est la quantité totale du produit j produite dans le pays à l'année t . En remplaçant dans l'équation (1) qui donne l'empreinte sols le flux de matière j exportée du pays producteur vers le pays consommateur par ce flux multiplié par $z_{t,j}$, on obtient l'empreinte déforestation. Si le produit j ne contribue pas à la déforestation (cas du produit « bleu » dans la figure 5), alors $p_{\tau,t,j} = 0$, donc $\bar{P}_{\tau,j} = 0$, et donc $z_{t,j} = 0$. Un tel produit aura une empreinte sols mais pas d'empreinte déforestation. Les calculs de Persson et al. (2014a) reposent sur un certain nombre d'hypothèses (lissage de la déforestation sur 10 ans, etc.). Ils ont au moins l'intérêt de montrer comment des informations cartographiques sur la déforestation provenant de la télédétection peuvent être utilisées pour passer de l'empreinte sols à l'empreinte déforestation, tout en prenant en compte la succession de cultures sur une parcelle déforestée et la temporalité de la déforestation.

5 Conclusions

5.1 Calculateurs du WWF, d'Envol Vert et de l'UICN

Les avantages et inconvénients respectifs des calculateurs d'empreinte déforestation du WWF, de l'UICN et d'Envol Vert peuvent être résumés comme indiqué dans le tableau 1. Les calculateurs du WWF et d'Envol Vert requièrent en entrée des données focalisées sur les produits ou filières considérés, ce qui permet de décrire finement ceux-ci. À l'inverse, l'utilisation d'une matrice d'entrée-sortie multirégionale à l'échelle de l'économie mondiale limite dans le cas du calculateur de l'UICN le niveau de précision qui peut être atteint dans la description des produits ou filières. Le calculateur d'Envol Vert se focalise entièrement sur la consommation en France et ne retrace pas les échanges entre pays. À la différence du calculateur du WWF (qui retrace les flux d'import-export entre pays) et de celui de l'UICN (qui retrace les interdépendances de production entre les pays), le calculateur d'Envol Vert n'est donc pas capable de décliner l'empreinte de la France selon les pays producteurs. Les calculateurs d'empreinte déforestation du WWF et d'Envol Vert sont tous les deux des calculateurs centrés sur le pays consommateur et reposent sur des listes assez semblables de produits agricoles et forestiers considérés comme responsables de la déforestation. Cette liste de produits responsables de la déforestation doit être fixée *a priori*. Au contraire, le calculateur de l'UICN est purement ascendant et part du constat de la déforestation dans les pays producteurs. Ce calculateur ajuste donc la liste des produits considérés comme responsable de la déforestation. Le calculateur du WWF et celui d'Envol Vert ont en commun de distinguer l'empreinte sols de l'empreinte déforestation, le ratio entre les deux étant estimé par le risque de déforestation. Cependant le calculateur du WWF mène l'analyse de risque de déforestation par pays tandis que celui d'Envol Vert mène l'analyse de risque par produit agricole ou forestier. Le risque de déforestation reste un indice composite et non une mesure observée. Le calculateur de l'UICN a moins l'avantage de s'appuyer sur des statistiques de déforestation. Cependant ces statistiques restent des statistiques nationales. Aucun des trois calculateurs n'intègre de données de télédétection pour spatialiser la déforestation.

Les estimations de l'empreinte déforestation de la France faites par les calculateurs du WWF et d'Envol Vert ne sont pas très cohérentes entre elles, ce qui provient de divergences de leurs calculs de l'empreinte sols. La comparaison avec les estimations du

Tab. 1 : Avantages et inconvénients respectifs des calculateurs d’empreinte déforestation du WWF, de l’UICN et d’Envol Vert. Code couleur : ● bonne capacité, ● des limitations, ● incapacité.

Critère	Calculateur		
	UICN	WWF	Envol Vert
Possibilité de décliner l’empreinte finement par produit ou filière	●	●	●
Possibilité de décliner l’empreinte par pays producteur	●	●	●
Possibilité d’identifier de nouveaux produits responsables de la déforestation	●	●	●
Passage de l’empreinte sols à l’empreinte déforestation	●	●	●
Intégration de données de télédétection	●	●	●

calculateur de l’UICN n’a pas pu être faite faute de documentation disponible sur ces estimations. L’approche du WWF pour le calcul de l’empreinte sols, qui repose sur la comptabilité des flux de matières à l’échelle de l’économie, est *a priori* plus fiable que celle utilisée par Envol Vert. Elle permet en particulier de décliner l’empreinte sols selon les différentes formes transformées des produits agricoles et forestiers et selon les pays d’origine de ces produits, là où la méthode d’Envol Vert ne permet qu’une déclinaison selon les différentes formes transformées des produits. Le calculateur du WWF permettra donc une validation de ses résultats (notamment en les confrontant aux résultats de calculateurs d’empreinte exportée par les pays producteurs) qui sera impossible avec le calculateur d’Envol Vert.

5.2 Limites et besoin de connaissances additionnelles

Les calculs d’empreinte sols nécessitent de connaître les flux d’import et d’export des produits agricoles et forestiers entre les pays (méthode des flux de matières) ou les coefficients décrivant les interdépendances de production entre secteurs et pays (méthode des entrées-sorties multirégionales), ainsi que divers coefficients et paramètres sur la transformation des produits et la productivité des sols qui les produisent. Même si la connaissance des flux, coefficients et paramètres peut être améliorée en affinant les bases de données qui les renseignent (par exemple Trase⁵ pour les flux de matières), en améliorant la traçabilité des produits, ou en menant des recherches spécifiques pour estimer ces coefficients et paramètres, on peut estimer que les bases de données déjà existantes qui renseignent ces flux, coefficients et paramètres sont déjà suffisantes pour les besoins actuelles de la SNDI.

Le choix des produits agricoles et forestiers considérés comme responsables de la déforestation peut également faire l’objet de consolidations. Les calculateurs du WWF et

5. <https://trase.earth/>

d'Envol Vert portent sur des produits qui sont parmi les premiers cultivés par les pays producteurs lorsqu'il y a déforestation, ce qui peut laisser dans l'ombre des produits venant plus tardivement dans la succession des productions (par exemple la canne à sucre), surtout si une temporalité assez courte est prise pour l'amortissement de la déforestation. On observe aussi un biais en faveur des produits cultivés dans les économies émergentes, au détriment de produits moins visibles dans la déforestation parce que provenant d'économies moins bien renseignées dans les statistiques mondiales (comme le tabac ou le coton, communication personnelle de Philippe Puydarrieux).

Les méthodes de calcul de l'empreinte sols peuvent aussi faire l'objet d'améliorations. Il faudrait surtout diagnostiquer pourquoi des calculateurs différents de l'empreinte sols de la France peuvent donner des estimations aussi divergentes, puis améliorer les méthodes pour qu'elles donnent des résultats cohérents.

La principale voie d'amélioration des calculateurs actuellement existants de l'empreinte déforestation de la France consistera toutefois à intégrer des informations cartographiques issue de la télédétection pour passer de l'empreinte sols à l'empreinte déforestation. Il faudra pour cela mener des recherches à l'interface entre deux champs disciplinaires : l'économie forestière d'une part et la cartographie (issue de la télédétection) d'autre part. Aussi bien le calculateur du WWF que celui d'Envol Vert reposent pour ce passage de l'empreinte sols à l'empreinte déforestation sur un indice composite qui intègre diverses informations à l'échelle du pays producteur ou de la filière, sans que l'on puisse clairement démêler l'effet des différentes productions, de leur succession dans le temps ou de leurs interactions spatiales, sur la déforestation. Le calculateur de l'UICN s'appuie sur des statistiques nationales et sur une clé de répartition des surfaces déforestées entre cultures. Toutes ces approches pour le calcul de l'empreinte déforestation pourraient potentiellement être contreproductives dans le cadre de la SNDI dans la mesure où des efforts locaux d'acteurs pour lutter contre la déforestation seraient dilués dans la performance d'ensemble du pays ou de la filière, et donc difficilement valorisables en tant que tels. Le travail de Persson et al. (2014a) peut être pris comme exemple de la voie à suivre. Des informations cartographiques issues de la télédétection permettraient de localiser l'empreinte déforestation et de tenir compte des différentes productions qui se succèdent dans le temps sur une parcelle déforestée et de la temporalité de cette déforestation. Tant que les flux d'échanges de produits agricoles et forestiers entre pays ne pourront être retracés à une échelle géographique aussi fine, des hypothèses seront nécessaires pour relier les zones géographiques de production aux flux d'échanges entre pays.

Références

- Arto, I., A. Genty, J. M. Rueda-Cantuche, A. Villanueva, et V. Andreoni. 2012. Global Resources Use and Pollution : Volume 1, Production, Consumption and Trade (1995-2008). No. EUR 25462 in JRC Scientific and Policy Reports. Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Bruckner, M., G. Fischer, S. Tramberend, et S. Giljum. 2015. Measuring telecouplings in the global land system : a review and comparative evaluation of land footprint accounting methods. *Ecological Economics* 114 :11–21.
- Cuypers, D., T. Geerken, L. Gorissen, A. Lust, G. Peters, J. Karstensen, S. Prieler,

- G. Fischer, E. Hitznyik, et H. Van Velthuis. 2013. The impact of EU consumption on deforestation : Comprehensive analysis of the impact of EU consumption on deforestation. No. 2013-063 in Technical Report. European Union.
- Envol Vert. 2018. L’empreinte forêt des français : comment arriver à zéro empreinte forêt ? Tech. rep., Paris, France.
- Galli, A., J. Weinzettel, G. Cranston, et E. Ercin. 2013. A Footprint Family extended MRIO model to support Europe’s transition to a One Planet economy. *Science of the Total Environment* 461 :813–818.
- Global Footprint Network. 2015. Les pays méditerranéens peuvent-ils prospérer si les ressources viennent à manquer ? Tech. rep., Initiative sur l’Empreinte Écologique en Méditerranée, Chatelaine, Suisse.
- Hansen, M., S. Stehman, et P. Potapov. 2010. Quantification of global gross forest cover loss. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107 :8650–8655.
- Jennings, S., et M. de Korte. 2018. Risky business : The risk of corruption and forest loss in France’s imports of commodities. Tech. rep., 3Keel and WWF France, Long Hanborough, UK.
- Karstensen, J., G. P. Peters, et R. M. Andrew. 2013. Attribution of CO₂ emissions from Brazilian deforestation to consumers between 1990 and 2010. *Environmental Research Letters* 8 :024005.
- Kastner, T., A. Schaffartzik, N. Eisenmenger, K.-H. Erb, H. Haberl, et F. Krausmann. 2014. Cropland area embodied in international trade : Contradictory results from different approaches. *Ecological Economics* 104 :140–144.
- Lin, D., L. Hanscom, A. Murthy, A. Galli, M. Evans, E. Neill, M. S. Mancini, J. Martindill, F. Z. Medouar, S. Huang, et M. Wackernagel. 2018. Ecological footprint accounting for countries : updates and results of the national footprint accounts, 2012–2018. *Resources* 7 :58.
- Marques, A., F. Veronesi, M. T. J. Kok, M. A. J. Huijbregts, et H. M. Pereira. 2017. How to quantify biodiversity footprints of consumption ? A review of multi-regional input–output analysis and life cycle assessment. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 29 :75–81.
- Miller, R. E., et P. D. Blair. 2009. *Input-output analysis : foundations and extensions*. 2nd ed. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- O’Brien, M., et S. Bringezu. 2018. European timber consumption : developing a method to account for timber flows and the EU’s global forest footprint. *Ecological Economics* 147 :322–332.
- O’Brien, M., H. Schütz, et S. Bringezu. 2015. The land footprint of the EU bioeconomy : Monitoring tools, gaps and needs. *Land Use Policy* 47 :235–246.

- Persson, M., S. Henders, et T. Kastner. 2014*a*. Trading forests : quantifying the contribution of global commodity markets to emissions from tropical deforestation. CGD Working Paper 384, Center for Global Development.
- Persson, U. M., S. Henders, et C. Cederberg. 2014*b*. A method for calculating a land-use change carbon footprint (LUC-CFP) for agricultural commodities—applications to Brazilian beef and soy, Indonesian palm oil. *Global change biology* 20 :3482–3491.
- Peters, G. P., R. Andrew, et J. Lennox. 2011. Constructing an environmentally-extended multi-regional input–output table using the GTAP database. *Economic Systems Research* 23 :131–152.
- Potapov, P., M. C. Hansen, I. Kommareddy, A. Kommareddy, S. Turubanova, A. Pichens, B. Adusei, A. Tyukavina, et Q. Ying. 2020. Landsat analysis ready data for global land cover and land cover change mapping. *Remote Sensing* 12 :426.
- Tukker, A., T. Bulavskaya, S. Giljum, A. de Koning, S. Lutter, M. Simas, K. Stadler, et R. Wood. 2014. The Global Resource Footprint of Nations. Carbon, water, land and materials embodied in trade and final consumption calculated with EXIOBASE 2.1. Leiden University, The Netherlands Organisation for Applied Scientific Research, Vienna University of Economics and Business, and Norwegian University of Science and Technology, Leiden, The Netherlands, Delft, The Netherlands, Vienna, Austria, and Trondheim. Norway.
- Wackernagel, M., et W. Rees. 1996. Our ecological footprint : reducing human impact on the Earth. ‘The New Catalyst’ Bioregional Series. New Society Publishers, Gabriola Island, Canada.
- Weinzettel, J., E. G. Hertwich, G. P. Peters, K. Steen-Olsen, et A. Galli. 2013. Affluence drives the global displacement of land use. *Global Environmental Change* 23 :433–438.
- Weinzettel, J., K. Steen-Olsen, A. Galli, G. Cranston, E. Ercin, T. Hawkins, T. Wiedmann, et E. Hertwich. 2011. Footprint Family technical report : Integration into MRIO model. Tech. rep., One Planet Economy Network, Godalming, UK.
- WWF France. 2018. Déforestation importée, arrêtons de scier la branche! Tech. rep., World Wide Fund for Nature, Le Pré-Saint-Gervais, France.
- Zaks, D. P. M., C. C. Barford, N. Ramankutty, et J. A. Foley. 2009. Producer and consumer responsibility for greenhouse gas emissions from agricultural production a perspective from the Brazilian Amazon. *Environmental Research Letters* 4 :044010.

Remerciements

Ce travail a été réalisé grâce aux ressources allouées au GIP ECOFOR par ses membres.

