
Combien de matériaux utilisons nous ?

Analyse de flux de matières et économie circulaire.

Cours dispensé le 09/02/2024 par Thomas Corre aux 12 étudiant·e·s de l'option Ingénierie des low-tech (projet WELOW) à l'Ecole Centrale de Nantes.

Document rédigé par les étudiant·e·s sur base de leurs notes prises durant l'intervention.

Table des matières

Introduction	3
Historique	3
Métabolisme social/industriel	3
Développement historique	3
MFA	4
Extraction de matière à l'échelle mondiale	4
Flux de matière : exemple de l'UE en 2018	4
Critères de circularité	5
MFA : Taux d'utilisation circulaire des matériaux	5
Cas particulier de MFA : cycle anthropogénique	5
Utilisation de MFA : Economie circulaire et ses limites	5
Economie circulaire	5
Utilisation de la MFA : l'économie circulaire et ses limites	6
Limites pratiques au recyclage	6
Empreinte matérielle	7
MFA : contribution aux analyses économiques	8
Conclusions	9

Introduction

Quelle quantité de ressources utilise-t-on ? (en masse)

- $\rightarrow \sim 100\text{Gt} = 12,5\text{t/pers/an} = 1,4\text{kg/pers/h}$
- Béton : $5,8\text{t/pers/an}$
- Biomasse (alim, bois d'oeuvre, ...) : $3,2\text{t/pers/an}$
- puis combustibles fossiles (2t/pers/an), et ensuite métaux ($1,2\text{t/pers/an}$)

Objectifs de la conférence :

- sensibilisation à l'Analyse de Flux de Matière
- connaître qqs indicateurs de l'utilisation de ressources
- discussion autour freins à l'éco circulaire

Historique

Métabolisme social/industriel

Métabolisme (biologie) : ensemble des processus par lesquels un organisme forme et maintient sa structure en échangeant matière et énergie avec son environnement.

Considérer le métabolisme d'un système social revient à analyser son économie en termes de stocks et de flux biophysiques : matière et énergie.

Il faut pour cela une approche transdisciplinaire (ingénierie, économie, sociologie, biochimie, écologie, ...), et à différentes échelles (état, ville, ...).

Ecologie industrielle : étude des processus industriels sous l'angle du métabolisme ("qu'est-ce qui rentre dans mes usines, qu'est-ce qui en sort").

L'écologie industrielle utilise l'**Analyse de Flux de Matière**.

Développement historique

Années 1960 : fondation du paradigme "métabolisme social"

- *The Limits To Growth" (Rapport Meadows)
- prise de conscience du rôle des ressources en économie
- analyse critique de la croissance
- des économistes, mathématiciens, physiciens, ...

Années 1990 : formalisation de la méthode d'Analyse des Flux de Matière (**MFA**)

- Méthode : bilan de masse sur un système sociétal fermé

Années 2010 : maturité de MFA

- standards de la MFA créés, entrées maîtrisées
- base de données internationales
- recherches financées par les institutions internationales (ONU, UE, ...)
- International Resource Panel ("le GIEC pour les ressources")

A partir de quand mesure-t-on le PIB ? \rightarrow Années 1930. (1932 USA)

L'énergie ? \rightarrow chocs pétroliers (1974 AIE)

MFA

- Bilan de masse de matière entrant dans le système en kg
- flux calculés sur chaque année
- => Comptabilité physique

Objectifs :

- calcul des besoins
- identification des matériaux critiques
- réglementations
- ...

Deux types de frontières à définir :

- territoriale : économie nationale, ville => **imports / exports**
- entre économie et son environnement naturel => **extractions / rejets**

Matériaux répartis en 50 groupes dans 4 grandes catégories (eau et air non comptabilisés) :

- biomasse
- minéraux non-métalliques (bétons, pierre, sels, ...)
- combustibles fossiles (pétrole, gaz, charbon, polymères,...)
- minerais métalliques

On est très précis sur la mesure des combustibles fossiles. A l'opposé on est mauvais à mesurer les minerais métalliques (combien de tonnes il faut extraire pour avoir un peu de métal dépend d'énormément de variables => incertitudes).

Extraction de matière à l'échelle mondiale

Taux de croissance annuel moyen entre 1970 et 2017

- PIB 3%
- Extraction 2,6%
- Population 1,5%

On peut faire différentes analyses, comme la répartition géographique de la Consommation Matérielle Domestique.

Flux de matière : exemple de l'UE en 2018

- import : 1,73Gt/an
- extraction domestique : 5,37 Gt/an
- export : 0,75Gt/an

Dans le système UE :

- Entrée (DMC) : 7,10Gt/an
- Sortie :
 - Matériaux : 4,55
 - * ajouts nets au stock : 2,76
 - Energie : 2,65
 - Export : 0,75

- Dissipation : 0,24
- Recyclage : 0,75 (depuis Matériaux vers entrée)
- Remblais : 0,21 (depuis Matériaux vers entrée)

DMC : Domestic Material Consumption = Domestic extraction + Net Imports

Différents indicateurs d'échelle :

- DMC
- sorties
- matériaux secondaires (circulaire)
- additions au stock

Critères de circularité

Comment quantifier le taux de réutilisation de matériaux ?

- Critère en sortie (recyclage/sorties+secondaires) : 15%
- Critère en entrée (recyclage/DMC+secondaires) : 10%

Comment on compte la biomasse ? recyclée naturellement ? On définit plutôt un max, la vraie valeur est inférieure, on ne connaît pas les valeurs de déforestation, pertes arables etc.

- en sortie : 50%
- en entrée : 27%

MFA : Taux d'utilisation circulaire des matériaux

- moyenne UE 2022 : 11,5%
 - par catégorie : minerais 25% > minéraux 15% > biomasse 9% > combustibles 3%
- par pays c'est très lié au mix énergétique

Cas particulier de MFA : cycle anthropogénique

Exemple du cycle de l'aluminium à l'échelle mondiale en 2009 : graphe montrant l'intégralité du cycle de vie mondial de l'aluminium en une image !

version 2009 : Liu, G., Bangs, C. E., & Muller, D. B. (2013). Stocks dynamics and emission pathways of the global aluminium cycle. *Nature Climate Change*, 3(4), 338.

version 2023 : <https://alucycle.international-aluminium.org/public-access/public-global-cycle/>

Utilisation de MFA : Economie circulaire et ses limites

Economie circulaire

Déf ADEME : système économique d'échange et production qui à tous les stades du cycle de vie des produits (biens et services) vise à augmenter efficacité de l'utilisation des ressources et diminuer l'impact sur l'environnement tout en permettant le bien-être des individus.

Approche des “4R” :

1. **Réduire** la consommation de ressources / la production
2. **Réutiliser** les produits
3. **Recycler** les matériaux
4. **Récupérer** de l'énergie

Concept à la mode

- perçu comme branche applicative du développement durable
- très débattu : champ actif de recherche académique
- intégré aux politiques européennes :
 - Plan de 2015 à 2020 : boucler la boucle - Un plan d'action de l'UE en faveur de l'économie circulaire
 - * un exemple de point clé : 2020 Green New Deal
 - Loi AGECE votée en 2020 en France

Utilisation de la MFA : l'économie circulaire et ses limites

Freins potentiels :

- efficacité 100% impossible
- usages dispersifs
- nombreux produits très difficiles à recycler, process très techniques

Limites pratiques au recyclage

Usages dispersifs

- utilisation de matériaux non réutilisables
 - combustibles fossiles
 - usages dispersifs (engrais, sels, ...)
 - pertes de matières non répertoriées : terres arables, ressources halieutiques, forêts, ...

MFA pour quantifier (exemple UE DMC combustibles fossiles : 18%)

Difficultés techniques

- Difficile de récupérer les matériaux
- perte de qualité des matériaux
- rendement énergétique/matériau pas forcément favorable

MFA pour suivre les avancées du recyclage, exemple le taux de recyclage en entrée : plomb 75% est le mieux recyclé. . .

Stock en utilisation : matériaux utilisés pendant plus d'un an : infrastructure durables (voitures,...)

Croissance des stocks en utilisation

Stock mondial en 2015 : 1033Gt +/- 8%

Estimation à partir de modèles :

- suivi de l'ajout au stock
- estimation de la quantité d'infrastructures
 - Méthode Bottom-Up : par extrapolation d'une mesure précise à petite échelle
 - Autre méthode : intégrer l'ajout net au stock sur une longue durée
- modèle de durée de vie des infrastructures

Moyenne mondiale du stock en utilisation par personne en 2010 : 115t/pers. x3 pour les pays industrialisés, Chine dans la moyenne, /3 pour le reste du monde

Addition nette au stock est la dérivée du stock en utilisation : croissance exponentielle de l'addition nette pour moyenne du monde, croissance linéaire pour industrialisés depuis 30 Glorieuses, croissance exponentielle Chine depuis années 1990.

Impact sur le taux de recyclage Apport important de matériaux neuf aux stock :

- Des efforts de recyclage en entrée (minéraux non-métalliques 37%, métaux 77%)
- Mais des taux de recyclage en sortie décevants (minéraux non-métalliques 11%, métaux 27%)

Vers une saturation des stocks ? Exemple d'une courbe traçant le stock d'acier en fonction du PIB pour différents pays :

- on observe une stabilisation du stock d'acier lorsque le PIB augmente (avec le temps donc)

La saturation des stocks est un champ de recherches actuel

- travaux de modélisation
- questions : saturation à quels niveaux ? quand ?

Empreinte matérielle

Perception biaisée de la consommation de matière : la délocalisation de la production : 1kg de produit fini importé = 1kg de matière extraite localement.

Deux indicateurs différents :

- DMC : flux physique qui traversent effectivement une économie
 - extraction locale
 - importations nettes
- Material Footprint (MF) ou Raw Material Consumption (RMC): allouer à l'économie l'ensemble des matériaux utilisés pour satisfaire sa consommation finale
 - extraction locale
 - importations nettes
 - matériaux bruts correspondant aux importations
 - matériaux mobilisés à l'étranger pour produire les produits importés

A l'échelle mondiale ces deux indicateurs sont égaux. On utilise quand même les deux, qui sont complémentaires :

- DMC : orienté production locale du territoire
- MF ou RMC : orienté consommation

Comparaison DMC-MF : exemple de la France DMC :

- imports de combustibles fossiles principalement
- imports de minerais et minéraux aujourd'hui alors que dans les années 70 on les exportait
- exports de biomasse
- ~12t/habitant

MF :

- ~20t/habitant
- on est importateur net toute catégorie, même biomasse !

United Nations Environment Programme (UNEP). (2016). Resource efficiency : Potential and economic implications. A Report of the International Resource Panel. Nairobi, Kenya: UNEP : à télécharger ici => <https://www.unep.org/resources/report/resource-efficiency-potential-and-economic-implications-international-resource>

Importance du choix des indicateurs :

- pays très dépendants des imports : DMC diminue et MF augmente
- Pays exportateurs : DMC > MF

MFA : contribution aux analyses économiques

Découplage MRC/PIB entre 1990 et 2015 :

- on observe que découplage absolu lorsque gros problèmes dans pays (Irak...)
- pas du tout de découplage pour les UAE
- pas de découplage pour les pays comme France
- découplage relatif (même direction mais pas même vitesse) pour Chine

Le découplage PIB/ressources est un débat brûlant :

- observation par pays : découplage relatif fréquent, mais absolu rare
- quelle échelle prendre en compte ?
- découplage en énergie primaire ? en GES ? en matériaux ?
- saturation des stocks : par habitant ? à quel niveau ?

Etude 2020 Wiedmann et al, *Scientists' warning on affluence*, *Nature communication*, 11(1), 3107 :

- pas de découplage PIB/MF
- découplage relatif PIB/CO2

Quel modèle de développement ?

- l'ONU a tracé en 2017 l'empreinte environnementale en fonction de l'IDH pour les pays : observation que IDH augmente quand on respecte mieux les ODD...
- Etrangement les pays à très forte empreinte écologique sont les mieux classés sur les ODD...

Conclusions

- Focus sur la comptabilité physique
 - MFA: outil qui se généralise
 - stabilisation des définitions d'indicateurs (taux recyclage, DMC, MF,...)
 - analyse plus large :calcul de l'intensité matérielle (DMC/PIB,...)
- Eclairage différent sur notre mode de développement
 - conditions mise en place éco circ
 - réalité sur la “dématérialisation” ?

Chiffres :

- DMC européen moyen 2019 : 14t/pers/an
 - dont 10% recyclage
 - Applications (en entrée) :
 - * usage dans l'année : 10%
 - * alimentation 20%
 - * énergie (fossile) 20%
 - * ajout aux stocks 50%
- MF 14-17t/pers/an