



Impacts environnementaux des véhicules thermiques, électriques, autonomes ou automatisés : Comment les quantifier ?

Christine Buisson et Serge Pelissier

Rencontres de la mobilité Intelligente, Montrouge,

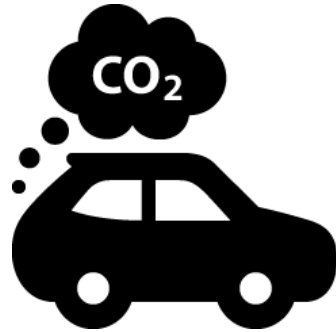
19 janvier 2022



Université
Gustave Eiffel

ENTPE
L'école de l'aménagement durable des territoires

Véhicule thermique (VT)



Véhicule électrique (VE)

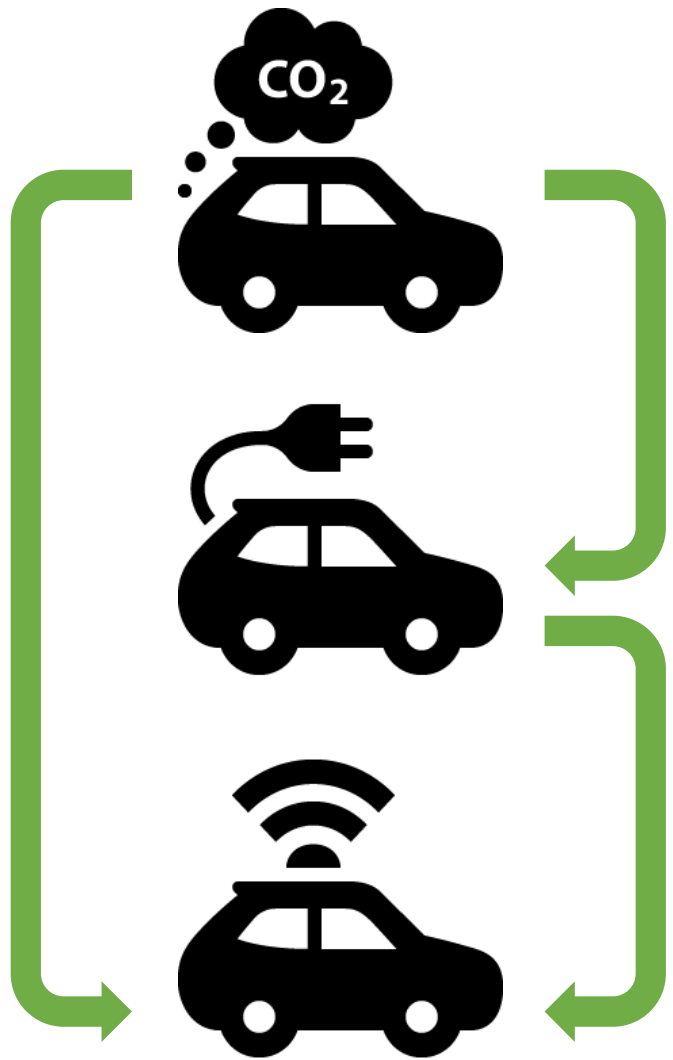


Véhicule automatisé (VA)



Remplacer
un moteur **thermique**
(essence ou diesel)
par un moteur électrique

Remplacer les yeux, le cerveau
et les membres
d'un **conducteur humain**
par des capteurs, des calculateurs
et des actionneurs
(si connectivité, accès à infos externes)



Comment évaluer les impacts environnementaux du véhicule électrique ou automatisé ?

Par comparaison

Principes de l'évaluation environnementale

Quels impacts environnementaux retenir ?

- Par exemple, pour la méthode ReCiPe, développée aux Pays Bas en 2008, il y a 18 impacts différents à prendre en compte :

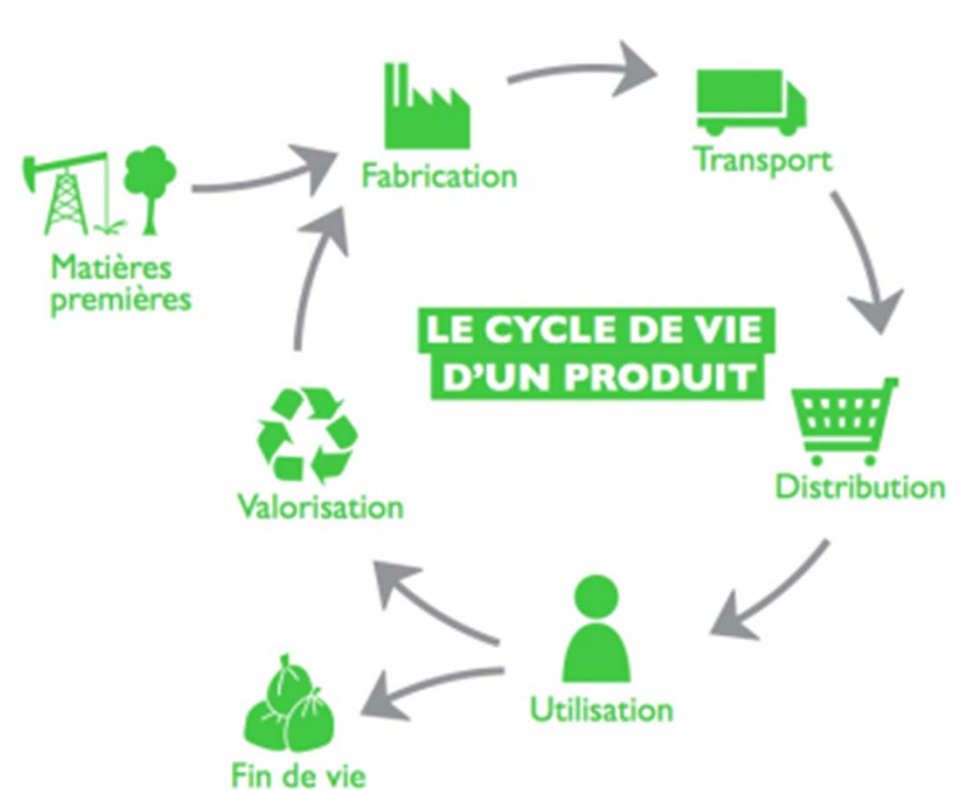
1. le changement climatique,
2. la formation de matières particulaires,
3. l'écotoxicité terrestre,
4. l'écotoxicité marine,
5. l'eutrophisation des eaux douces
6. l'eutrophisation des eaux marines,
7. la dégradation de la couche d'ozone,
8. l'acidification des terres,
9. la toxicité pour les humains,
10. la formation d'oxydants photochimiques,
11. l'acidification terrestre,
12. les rayonnements ionisants,
13. l'utilisation de terres agricoles,
14. l'utilisation d'espace urbain,
15. la transformation des espaces naturels,
16. l'utilisation des ressources en eau,
17. l'utilisation des ressources en minerais
18. l'utilisation d'énergies fossiles.

Les impacts pris en compte dans cette présentation

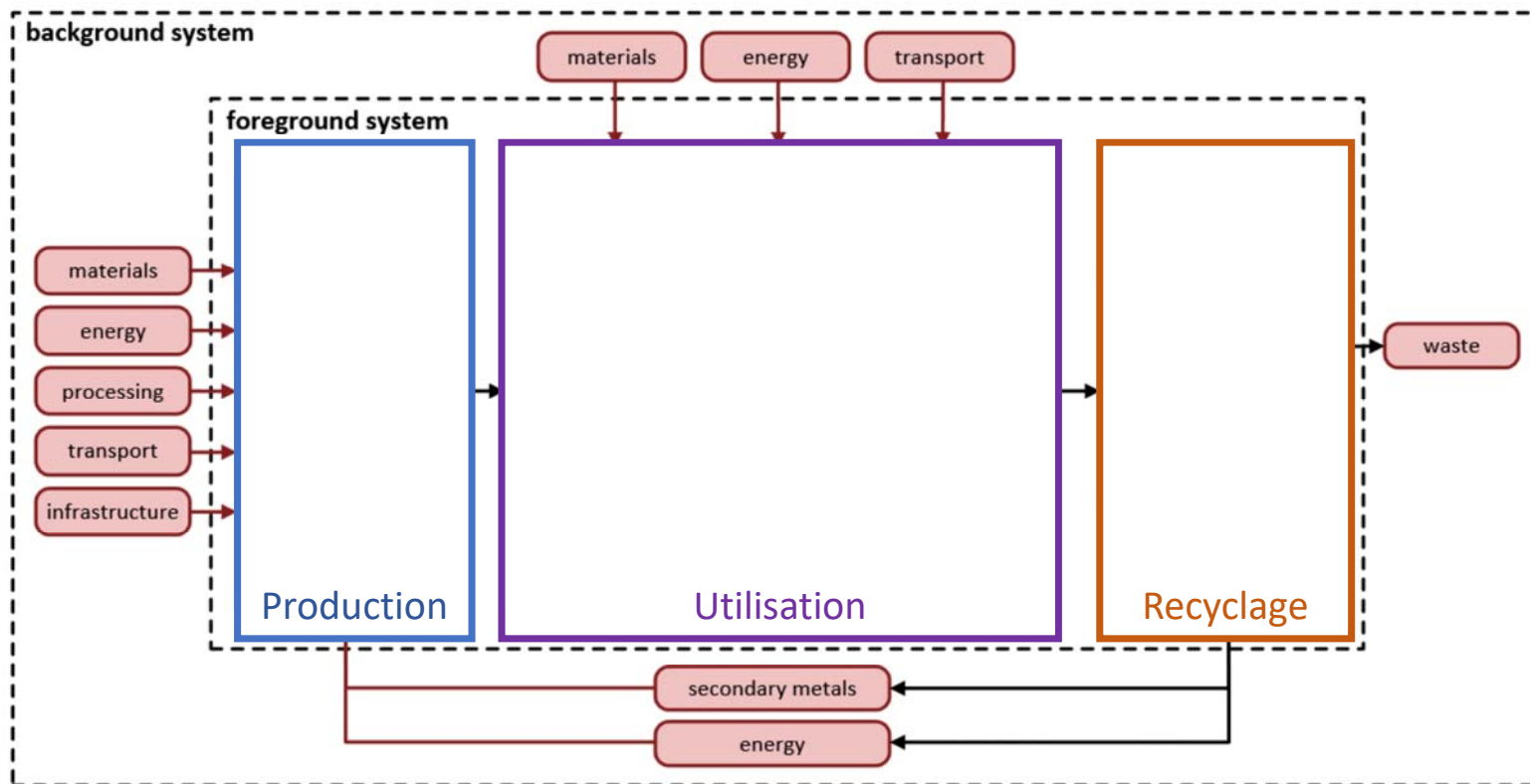
- 1. le changement climatique,**
- la formation de matières particulaires,
- l'écotoxicité terrestre,
- l'écotoxicité marine,
- l'eutrophisation des eaux douces
- l'eutrophisation des eaux marines,
- la dégradation de la couche d'ozone,
- l'acidification des terres,
- 9. la toxicité pour les humains,**
- la formation d'oxydants photochimiques,
- l'acidification terrestre,
- les rayonnements ionisants,
- l'utilisation de terres agricoles,
- l'utilisation d'espace urbain,
- la transformation des espaces naturels,
- l'utilisation des ressources en eau,
- 17. l'utilisation des ressources en minerais,**
- l'utilisation d'énergies fossiles.

Une famille de méthodes d'analyse des impacts environnementaux

- Un principe commun :
l'analyse du cycle de vie,
pour comparer deux produits
 - Sur l'ensemble de la vie du produit
 - A service rendu équivalent**→ notion d'unité fonctionnelle**
- Et des résultats différents
 - 14 logiciels différents disponibles sur le marché (Helmers, Dietz, Weiss. Sustainability, 2020)
 - Avec, pour chacun, chacun des spécificités :
 - Sur les impacts pris en compte et
 - Sur la quantification de chaque impact



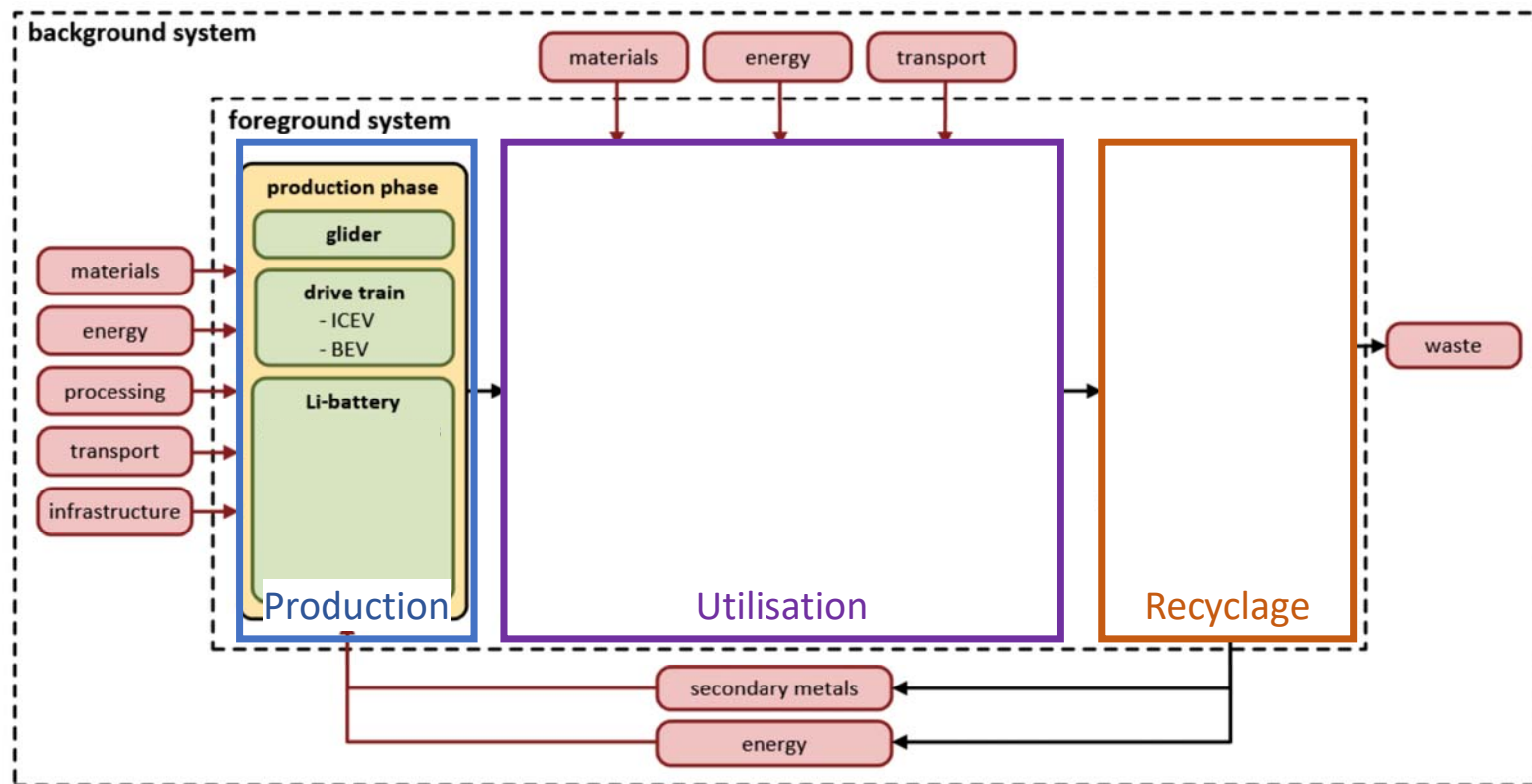
3 phases prises en compte dans le cycle de vie : production, utilisation, recyclage



ICEV: Internal Combustion Engine Vehicle (=VT)

BEV: Battery Electric Vehicle (=VE)

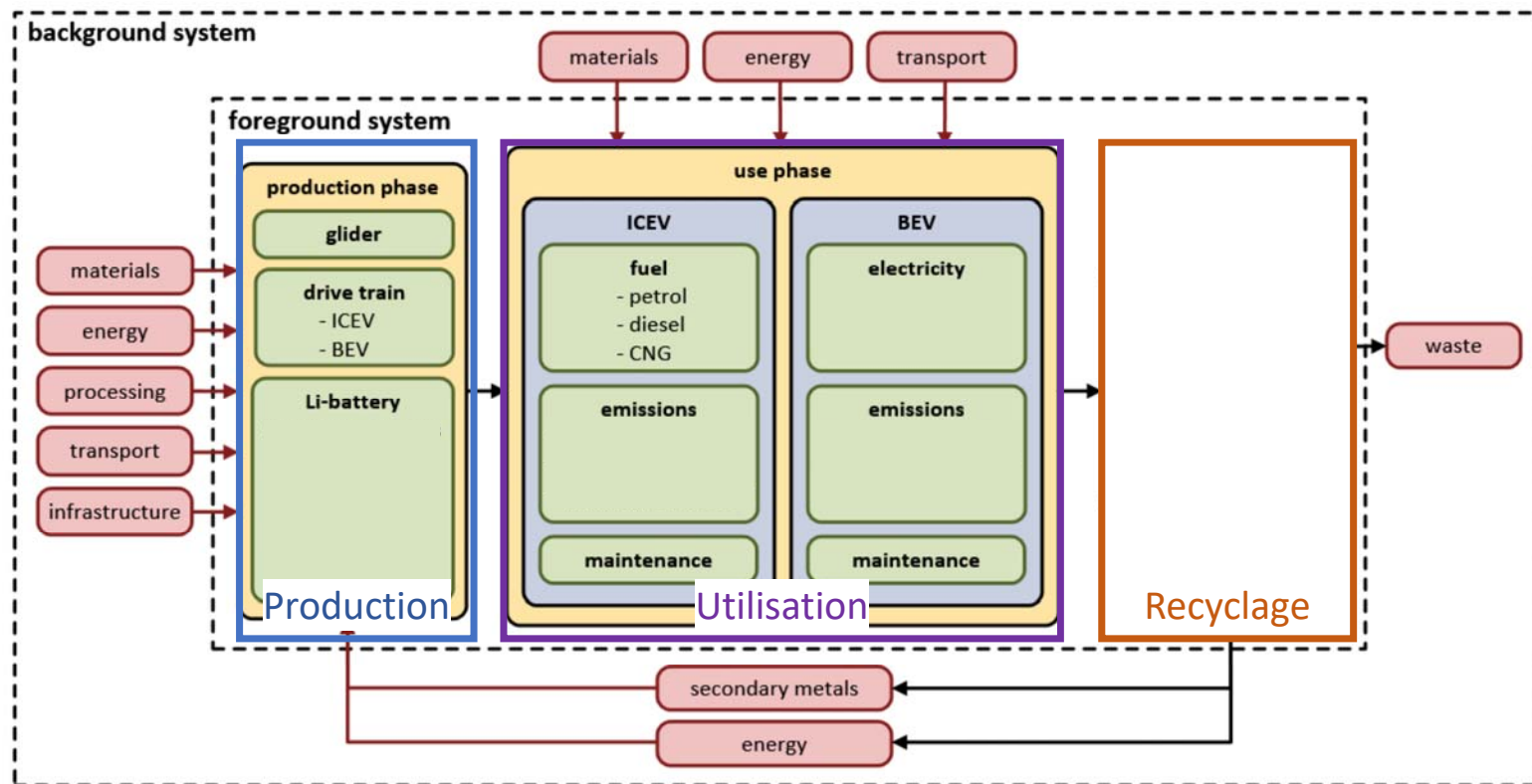
3 phases prises en compte dans le cycle de vie : production, utilisation, recyclage



ICEV: Internal Combustion Engine Vehicle (=VT)

BEV: Battery Electric Vehicle (=VE)

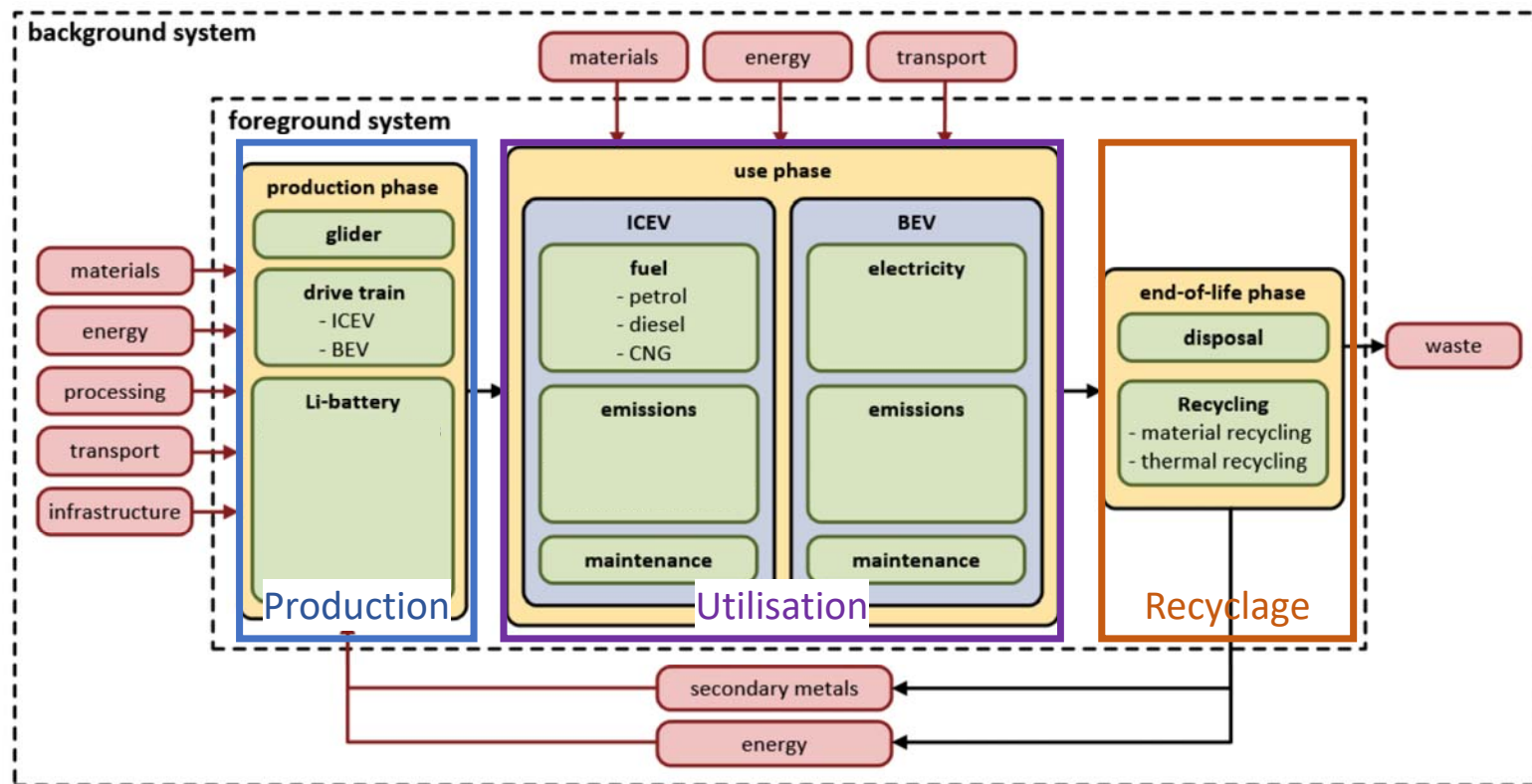
3 phases prises en compte dans le cycle de vie : production, utilisation, recyclage



ICEV: Internal Combustion Engine Vehicle (=VT)

BEV: Battery Electric Vehicle (=VE)

3 phases prises en compte dans le cycle de vie : production, utilisation, recyclage



ICEV: Internal Combustion Engine Vehicle (=VT)

BEV: Battery Electric Vehicle (=VE)

Quelle unité fonctionnelle ?

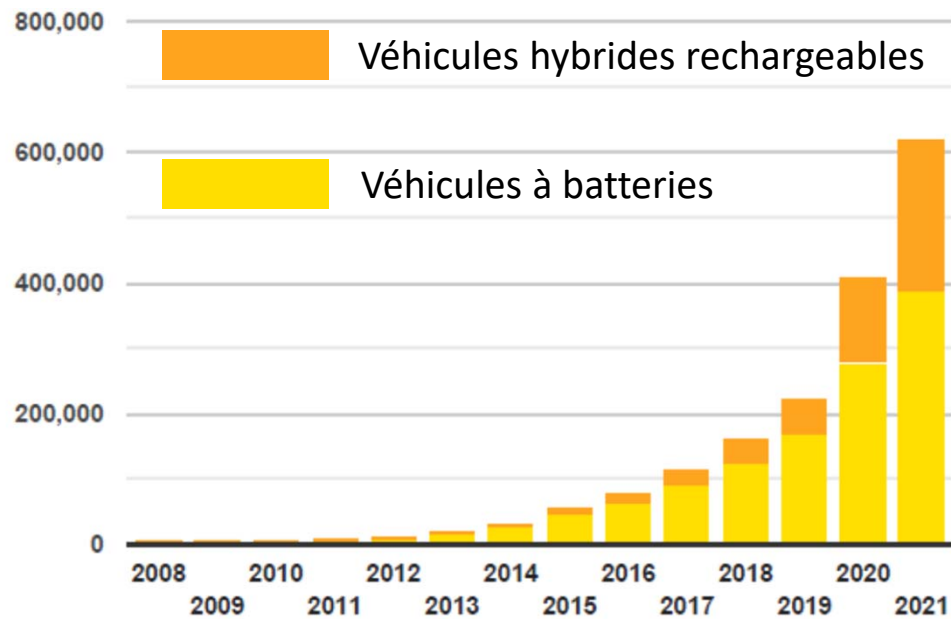
- Le **kilomètre parcouru** est la mesure utilisée
- Nombre de kilomètres dans la vie d'une voiture ? $N^{km} = 150\ 000$
- À noter : Les nouvelles batteries conservent 90% de leur capacité après avoir parcouru cette distance (Helmets, Dietz, Weiss, Sustainability, 2020)
→ une seule batterie suffit et son recyclage est très rentable

- Estimation de l'impact I par kilomètre parcouru

$$I^{km} = \frac{I_{Fabrication} + I_{Utilisation}^{km} \times N^{km} + I_{déchet} - I_{Recyclage}}{N^{km}}$$

Cas du véhicule électrique

En France, électrification rapide du parc de véhicules particuliers depuis 2010

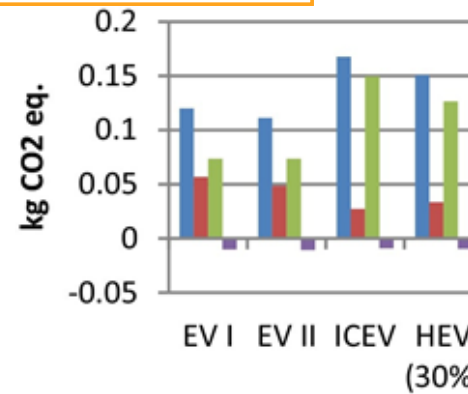


- Fin 2021, en France :
621 700 véhicules particuliers électriques
- Par rapport au parc total :
31 700 000 véhicules particuliers
- **1,96 %** du parc de véhicules particulier est électrique fin 2021
- Projections :
 - Entre 4 et 8 millions en 2030
 - Entre 5 et 16 millions en 2035

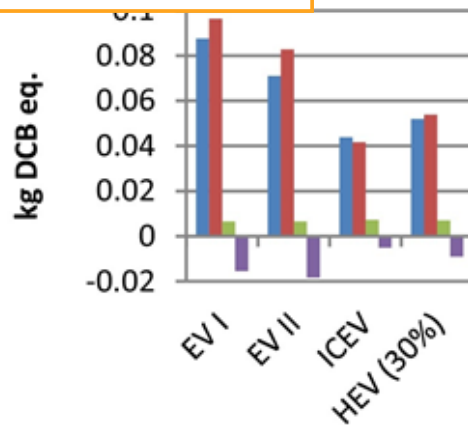
Un exemple avec 3 impacts examinés sur 4 voitures

- EV I et EV II : Véhicules électriques Nissan Leaf avec 2 batteries différentes
- ICEV: Véhicule thermique Toyota Yaris
- HEV: Véhicule hybride avec 30 % de consommation électrique

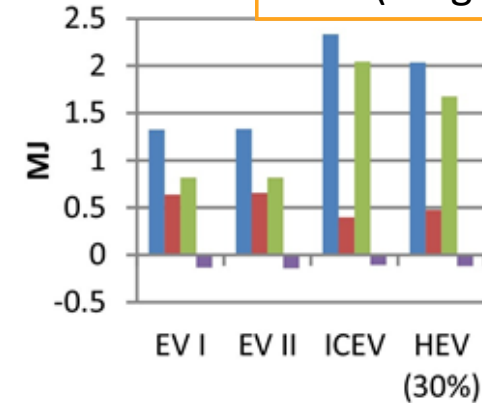
GWP: Global Warming Potential (kg CO2 eq.)



HTP: Human Toxicity Potential (kg Dichlorobenzène eq.)



ADPf: Abiodic Depletion Potential (fossil) (Mega Joules)

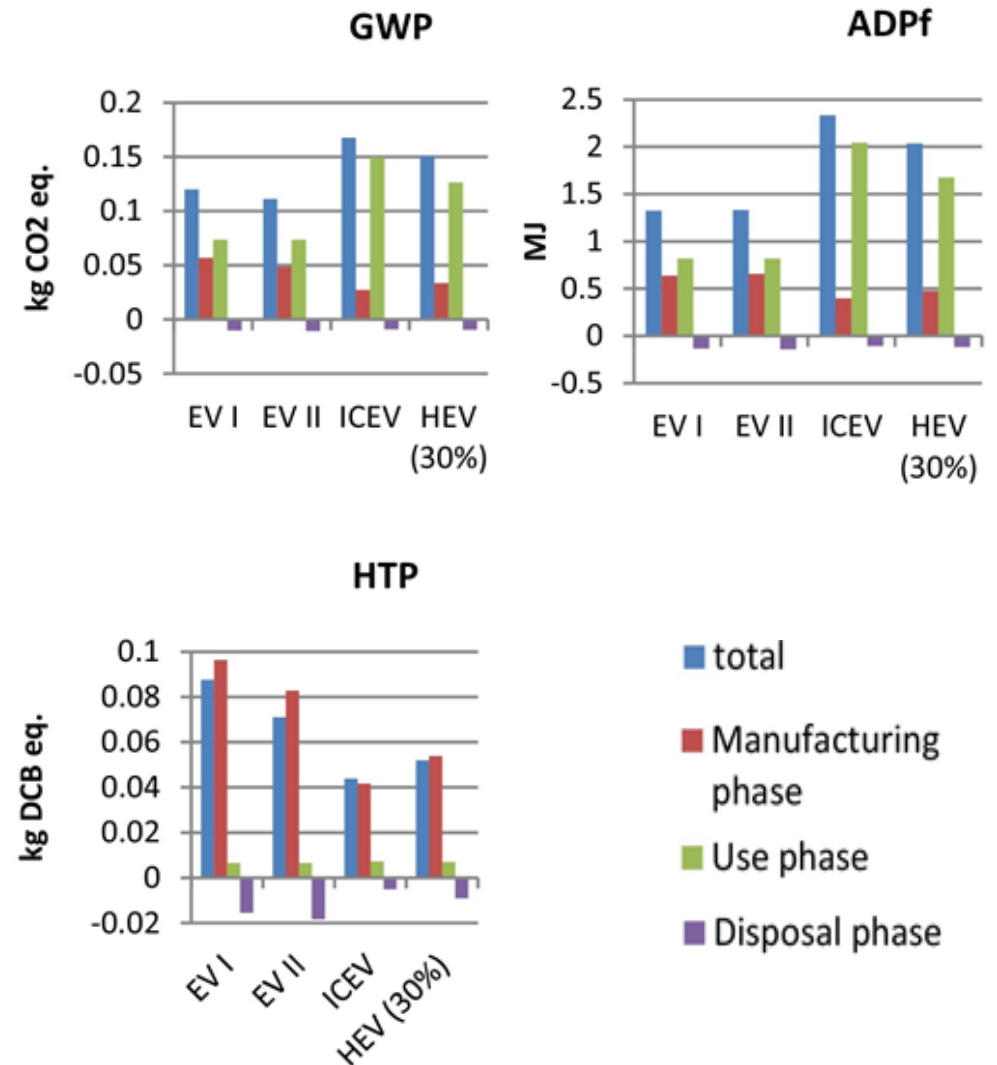


■ total
 ■ Manufacturing phase
 ■ Use phase
 ■ Disposal phase

Source : Tagliaferri, Evangelisti, Acconcia, Domenech, Ekins, Barletta, Lettieri. 2016. *Chemical Engineering Research and Design* 112 <https://doi.org/10.1016/j.chemd.2016.07.003>

Que retenir, pour ces 4 voitures ?

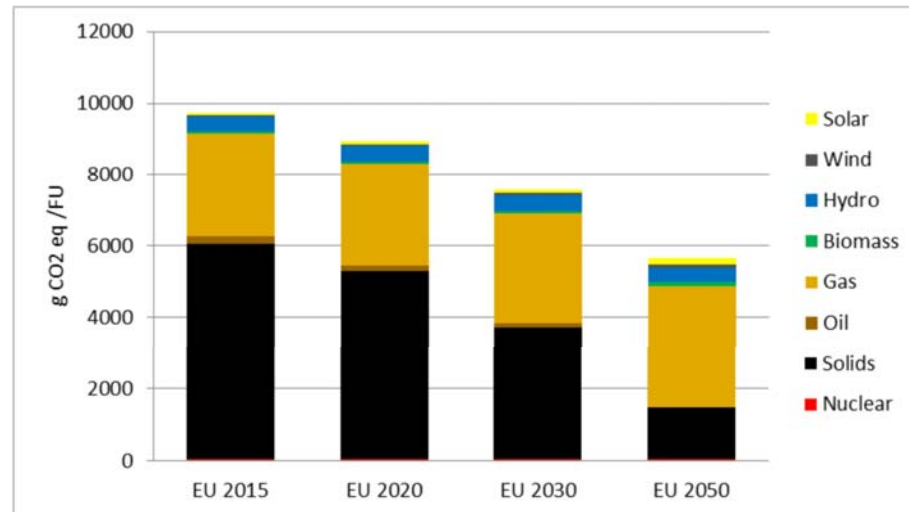
- Hypothèses :
 - Energie électrique : mix européen
 - Cycle de conduite : NEDC
 - Recyclage poussé
- Ces véhicules électriques ne sont pas bons en termes de toxicité pour l'homme (HTP)
- Mais meilleurs sur les deux autres critères
- Ce véhicule hybride n'est pas un bon choix
- Les impacts varient d'une voiture électrique à l'autre sur HTP (effet du choix de la batterie)



Quels impacts du mix énergétique ?

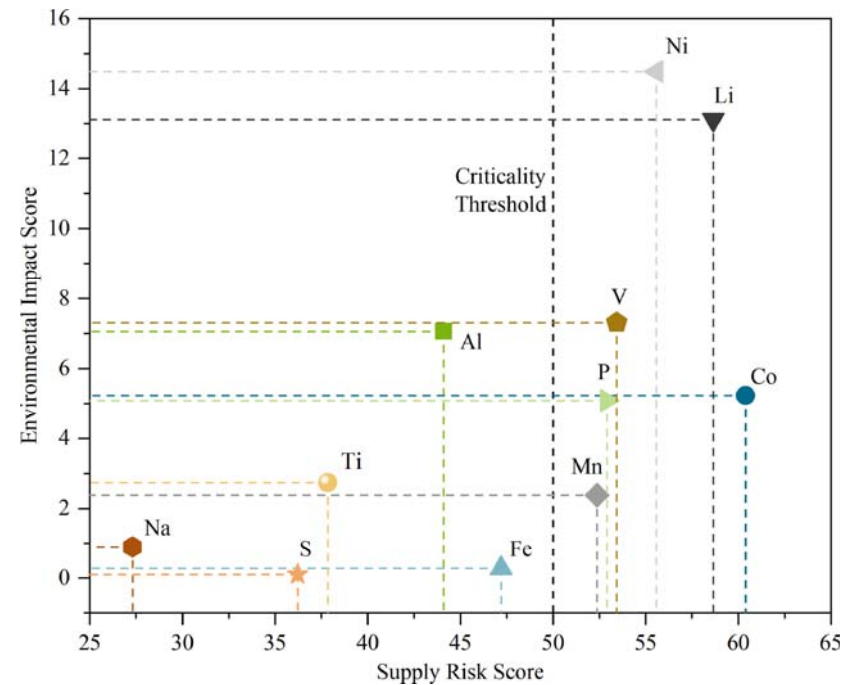
- Suivant la manière dont l'électricité est produite, la consommation de la batterie a des effets très différents sur les impacts
- Une évolution pour une énergie plus renouvelable est recommandée et programmée

Politique européenne sur les GES associés à la production d'électricité : impact sur l'ACV du VE



Quels impacts de la fabrication et du recyclage de la batterie ?

- Fabrication
 - Matériaux utilisés dans la production des batteries :
 - Lithium, Cobalt, Nickel, Manganèse, Graphite, ...
 - Durabilité de chaque ressource pour les différents matériaux ?
 - Impact de l'extraction, du traitement
 - Combinaison spécifique de matériaux dans chaque batterie
- Recyclage et / ou réutilisation ?



Cas du véhicule électrique autonome

Quelle estimation de l'impact environnemental des véhicules électriques autonomes ?

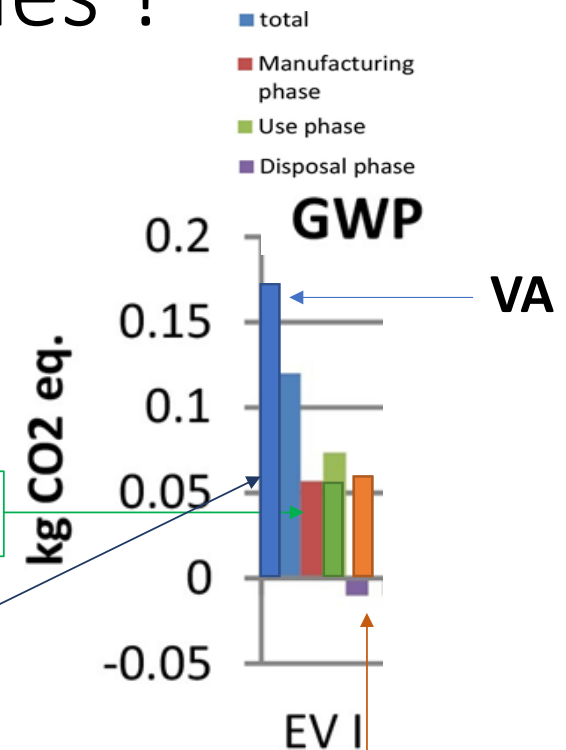
- Il peut être plus léger (car il a moins d'accidents) de 7 à 8% ce qui permettrait une réduction du coût d'énergie de 4 à 6 %
- Le véhicule automatisé sera éco-conduit.
« Les gains théoriques sont de l'ordre de 20 à 50 %, mais ils seront probablement bien moins importants en situation de conduite réelle ».
- Il est plus gourmand en matériaux et énergie à la construction : + 35 g eq.CO2/km
- Il produit beaucoup de données (2,7 TO/h de conduite), qu'il doit échanger : + 26 g ep. CO2/km.

Quelle estimation de l'impact environnemental des véhicules électriques autonomes ?

- Il peut être plus léger (car il a moins d'accidents) de 7 à 8% ce qui permettrait une réduction du coût d'énergie de 4 à 6 %
- Le véhicule automatisé sera éco-conduit. « Les gains théoriques sont de l'ordre de 20 à 50 %, mais ils seront probablement bien moins importants en situation de conduite réelle ».
- Il est plus gourmand en matériaux et énergie à la construction : + 35 g eq.CO2/km
- Il produit beaucoup de données (2,7 TO/h de conduite), qu'il doit échanger : + 26 g ep. CO2/km.

Réduction du coût lié à l'écoconduite

**Effet total approximatif :
de +20% à +40 % sur le cycle de vie !**



**Coût additionnel
lié à l'autonomie**

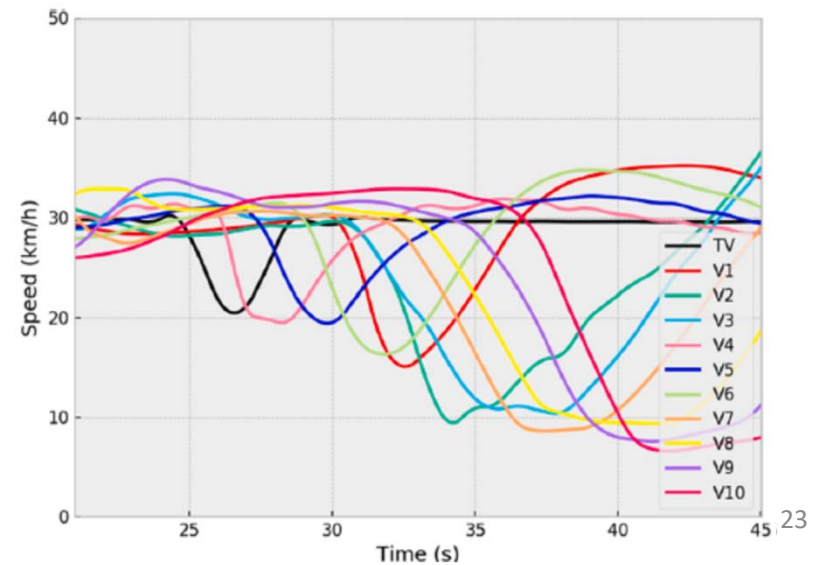
Quel estimation de l'impact environnemental des véhicules électriques autonomes **connectés** ?

- Le véhicule autonome, s'il est connecté, pourra recevoir des consignes pour adapter sa vitesse
 - Franchir les carrefours sans s'arrêter aux feux rouges (GLOSA)
 - Absorber les effets d'accordéon, pour un effet global sur la consommation (Stern et al, TR-D, 2018)
- Un équipement lourd de l'infrastructure :
 - Connectivité nécessaire pour localiser **les véhicules** et pour **les réguler**
 - En France
 - Routes nationales : 10 500 km
 - Autoroutes : 12 000 km
 - Routes départementales : 380 000 km
 - Chemins vicinaux : ?

Observations récentes de véhicules partiellement automatisés

- Véhicules automatisés peu observés en trafic réel
- Observations récentes de véhicules à contrôle automatisé de vitesse (ACC)
- Mise en évidence d'effets d'amplification des accélérations dans un groupe de véhicules

→ plus de consommation !

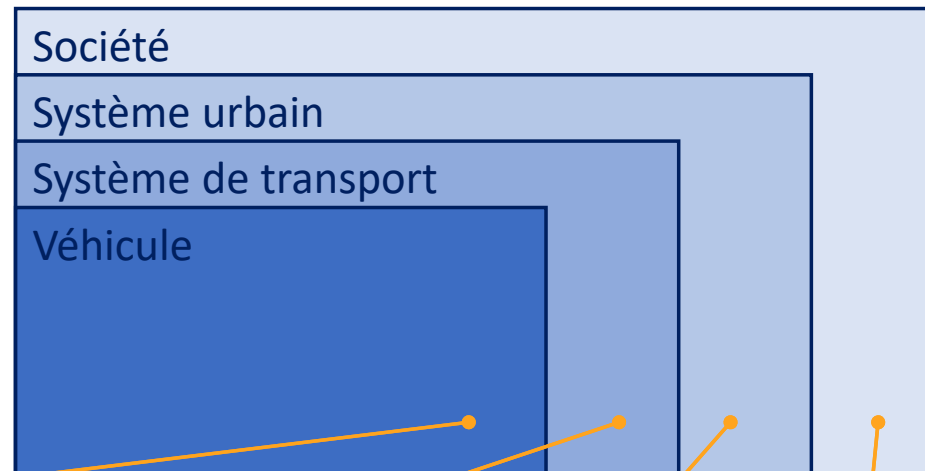


Limites et conclusions

Limites du principe de l'unité fonctionnelle

- Le véhicule autonome modifie le comportement du trafic global
 - **Il faut estimer l'effet d'une proportion de VA sur les impacts environnementaux des km parcourus en VA, en VE et en VT**
- Le véhicule autonome modifie l'usage du véhicule et les pratiques :
 - Quel est le coût perçu par l'utilisateur d'un trajet sans tâche de conduite ?
 - Qui le possède et le supervise ? véhicule personnel ou navette partagée ?
 - **Il faut intégrer les modifications de la mobilité, car le système de transport est un *systeme***

Synthèse des effets du véhicule connecté et automatisé



- Fonctionnement du véhicule
- Conception du véhicule
- Motorisation
- Conduite en pelotons

- Coûts/ temps déplacements
- Evol. services de mobilité
- Utilisation du véhicule
- Capacité et congestion

- Implications sur l'infrastructure
- Intégration des véhicules dans le réseau électrique
- Usage de l'espace

- Comportements de mobilité
- Mobilité partagée
- Logistique, tourisme
- Marché de l'emploi

Essai de conclusion

- Il est faux de dire que le véhicule électrique ne pollue pas
- Diversité des impacts environnementaux des activités humaines,
→ difficulté d'évaluer comparativement deux objets,
même pour un usage identique (même unité fonctionnelle)
- Le système de transports est un système : chaque déplacement ne peut être pris isolément et ce système fait partie du système urbain
→ complexité de l'évaluation environnementale d'une évolution forte du système de transports (limite de la notion d'unité fonctionnelle)
- La littérature étudiée pour cette présentation est surtout théorique,
→ nécessité d'un travail expérimental, à toutes les échelles,
pour quantifier les incertitudes et les leviers d'action
- **C'est complexe ! Donc c'est intéressant !**



**Merci de votre attention !
Avez-vous des questions ?**

Impacts environnementaux des véhicules thermiques, électriques, autonomes ou automatisés : Comment les quantifier ?

Christine Buisson et Serge Pelissier

Rencontres de la mobilité Intelligente, Montrouge,

19 janvier 2022



**Université
Gustave Eiffel**

//ENTPE
L'école de l'aménagement durable des territoires

Principales références

- Burchart-Korol, Jursova, Folęga, Pustejovska. 2020. "[Life Cycle Impact Assessment of Electric Vehicle Battery Charging in European Union Countries](#)". *Journal of Cleaner Production*.
- A. Carreras, X. Daura, J. Erhart, et S. Ruehrup, "[Road infrastructure support levels for automated driving](#)", 25th ITS World Congress, Copenhagen Denmark, sept. 2018.
- Ciuffo, Mattas, Makridis, et al. 2021. "[Requiem on the Positive Effects of Commercial Adaptive Cruise Control on Motorway Traffic and Recommendations for Future Automated Driving Systems](#)". *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*.
- Helmers, Dietz,. 2020. "[Sensitivity Analysis in the Life-Cycle Assessment of Electric vs. Combustion Engine Cars under Approximate Real-World Conditions](#)". *Sustainability* 12 (3): 1241..
- Pelissier, « [Peut-on recycler les batteries des véhicules électriques ?](#) », *The Conversation*. 19 sept. 2021.
- Saujot, Brimont, Sartor. 2018. « [Mettons la mobilité autonome sur la voie du développement durable](#) ». IDDRI. 18 juin 2018.
- Tagliaferri, Evangelisti, Acconcia, Domenech, Ekins, Barletta, Lettieri. 2016. "[Life cycle assessment of future electric and hybrid vehicles: A cradle-to-grave systems engineering approach](#)". *Chemical Engineering Research and Design* 112 (Supplement C): 298-309.
- Taiebat, Brown, Safford, Qu, Xu. 2018. "[A Review on Energy, Environmental, and Sustainability Implications of Connected and Automated Vehicles](#)". *Environmental Science & Technology* 52 (20): 11449-65.
- Williams, Das, Fisher. 2020. "[Assessing the Sustainability Implications of Autonomous Vehicles: Recommendations for Research Community Practice](#)". *Sustainability* 12 (5): 1902.
- Gomez-Patiño, 2022. « Variabilité inter-individuelle du comportement longitudinal de véhicules à conduite manuelle ou automatisée : impacts sur la capacité des voies ». Thèse de l'Université de Lyon, 11 mars 2022
- Les trois images de véhicules sont prises sur <https://iconmonstr.com/>