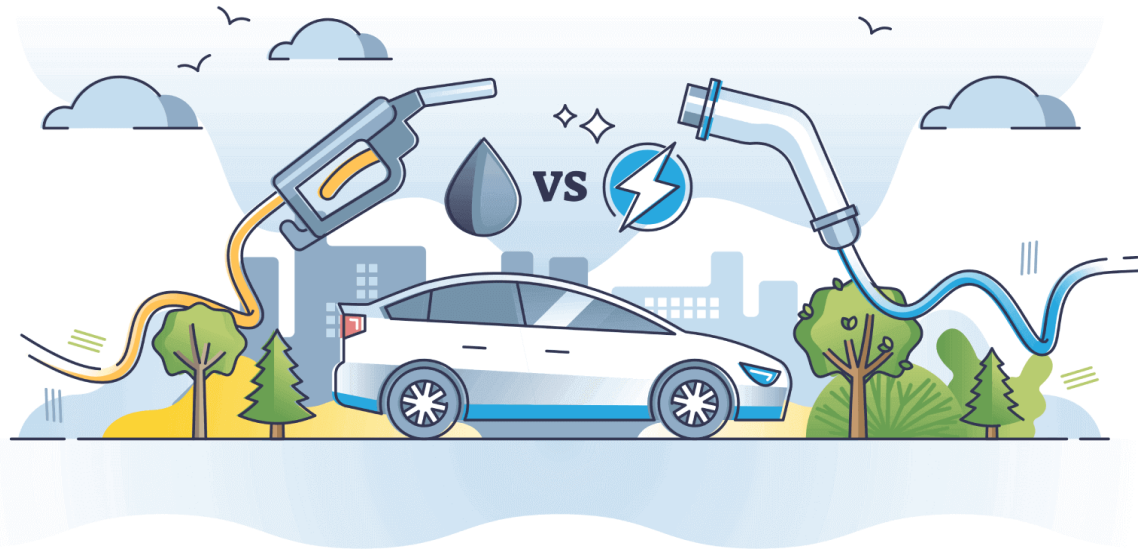


**Étude de cas : comparaison d'un véhicule thermique et d'un véhicule électrique**

**Durée prévue : 3 heures**

**Équipement : PC avec MS Excel et accès internet**



## Introduction

### Résumé

Nous allons comparer les impacts environnementaux d'une voiture thermique et d'une voiture électrique, en employant l'analyse du cycle de vie. Pour ce faire, il s'agira de suivre les étapes conventionnelles d'une ACV, à savoir 1. objectifs et périmètre de l'étude, 2. inventaire de cycle de vie, 3. analyse d'impacts de cycle de vie, 4. interprétation.

### Mise en situation

Vous avez été mandaté par un grand constructeur automobile pour étudier les impacts environnementaux de deux nouveaux modèles de voiture, à savoir une avec une motorisation diesel, et l'autre avec une motorisation électrique à batterie. La réglementation européenne s'attachant à la poursuite des objectifs climatiques, le client est particulièrement intéressé par les émissions de gaz à effet de serre causées par les deux véhicules. La demande en énergie primaire (ou « empreinte fossile ») sera aussi calculée, ainsi que l'empreinte matérielle.

## Informations utiles pour l'étude

**Usage.** Les deux véhicules sont à comparer à usage équivalent, c'est-à-dire : **15000 km/an**, pour une durée de vie de **250000 km**. Les premiers tests montrent que le véhicule diesel consomme environ **6 l/100 km** en cycle mixte (urbain et autoroute), tandis que le véhicule électrique consomme **18 kWh/100 km** dans les mêmes conditions. Le véhicule électrique est rechargé principalement par un chargeur domestique dont les pertes sont d'environ **10%**.

**Production.** Le client vous donne quelques informations sur les propriétés des véhicules, à savoir : le véhicule thermique pèse **1700 kg**, et l'électrique **1600 kg** sans la batterie. Ladite batterie a une capacité de **64 kWh**, et est fabriquée en **Chine**.

En outre, le client vous donne la composition des véhicules par élément/matériau. Vous y avez joint les facteurs d'émissions de gaz à effet de serre (GES) et d'énergie primaire, par kg de chaque matériau.

Élément	Composition		Facteurs	
	Voiture thermique	Voiture électrique (hors batterie)	GES (g CO <sub>2</sub> eq./kg)	Énergie primaire (kWh/kg)
Acier	49.4%	44.6%	2470	8.9
Fonte	9.4%	5.4%	900	3.5
Aluminium	11.9%	16.1%	12050	53.2
Verre	2.2%	2.4%	1130	3.3
Peinture	0.4%	0.4%	5680	28
Plastiques	11.0%	11.6%	3610	8.6
Gomme	3.7%	4.0%	3300	9.9
Lubrifiant	0.9%	0.4%	4200	13.3
Cuivre	2.3%	3.7%	3610	11.9
Métaux non ferreux	0.4%	1.6%	7670	30.3
Électronique	4.7%	5.7%	36630	133.4
Textiles	3.7%	4.1%	24250	75.2
Fibre de carbone	0.0%	0.0%	18940	90.2

## Questions

### 1. Objectifs et périmètre

- 1.1. Résumer en une phrase l'objectif de l'étude, à quoi seront destinés les résultats
- 1.2. Tracer un diagramme représentant le système à étudier pour chacun des véhicules. Cela pourra se faire sous cette forme :

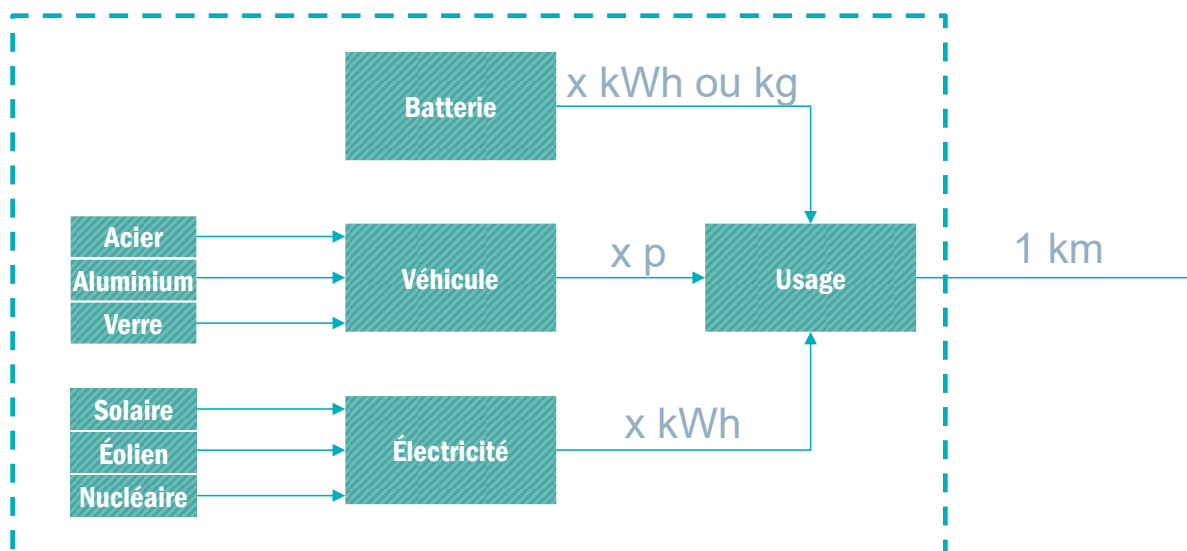


Figure 1. Diagramme simplifié des éléments considérés comme faisant partie du système étudié pour l'ACV du véhicule électrique.

- 1.3. Quelle est l'unité fonctionnelle de l'étude ? Comment la définir afin que les résultats soient comparables à d'autres modes de transport ?

## 2. Analyse d'inventaire

Cette étape consiste à construire le jeu de données nécessaire au calcul d'impact, autrement appelé « inventaire de cycle de vie ». Dans sa version « opérationnelle », cet inventaire prend la forme d'une matrice carrée reprenant tous les éléments du diagramme du système ACV, ainsi qu'une matrice d'émissions reprenant les facteurs d'émission de GES de chaque procédé. En termes mathématiques, c'est la matrice adjacente du graphe mis à l'échelle d'1 km.

Il reste quelques informations à calculer avant de pouvoir compléter l'inventaire. Ces informations sont à compléter dans le fichier « SPN\_ACV\_TP\_données », onglet « Inventaire ».

### UN PEU D'ALGÈBRE

#### Formulation d'un modèle ACV

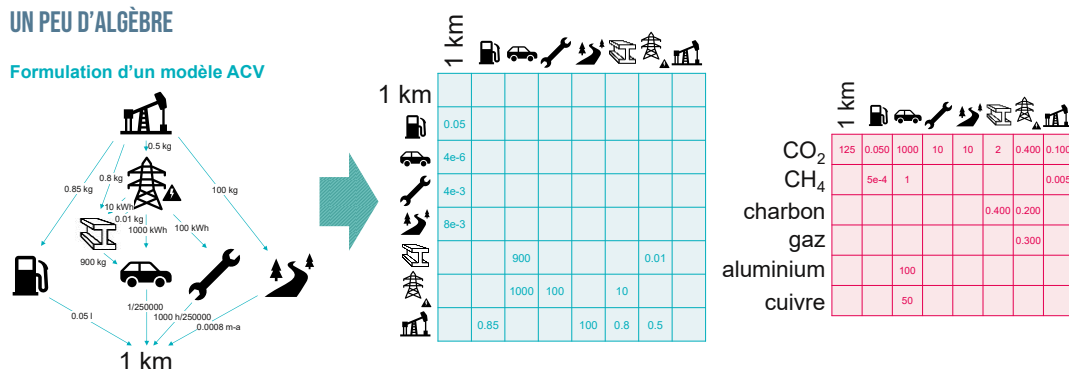


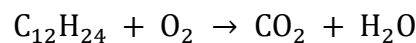
Figure 2. Matrices A (« technosphère ») et B (« biosphère ») reprenant les éléments nécessaires au calcul de l'inventaire de cycle de vie.

- 2.1. Déterminer la durée de vie (en années) de la voiture en utilisant sa durée de vie (en km) et son utilisation annuelle (en km/an).

Correspondance dans l'onglet « Inventaire » : 1

- 2.2. Déterminer les émissions directes de la voiture thermique, en g CO<sub>2</sub>/km, en utilisant :

- Sa consommation (en l/100 km)
- La réaction de combustion du gazole routier (qu'on peut approximer par C<sub>12</sub>H<sub>24</sub>)



- Les masses molaires des différents éléments impliqués :
  - o H : 1 g/mol
  - o C : 12 g/mol
  - o O : 16 g/mol
- Et la densité massique du gazole routier : 0.85 kg/l

Correspondance dans l'onglet « Inventaire » : 2

- 2.3. Il faut maintenant estimer la **composition des véhicules**. Sur la base des poids à vide fournis par le client, et la composition d'un véhicule (onglet « Composition voiture »), calculer la masse de chaque élément par véhicule et remplir la partie correspondante dans la matrice A.

Correspondance dans l'onglet « Inventaire » : 3

- 2.4. L'électricité utilisée dépend du lieu et du moment de la charge. Quels sont les points d'attention à prendre en compte en ce qui concerne la charge d'une voiture ?

Les mix électriques nationaux annuels de la France et de l'Allemagne sont fournis dans l'onglet « Mix électriques ». Quelles limitations y a-t-il à utiliser ces mix ?

Correspondance dans l'onglet « Inventaire » : 4

### 3. Analyse d'impacts

Cette étape inclut le calcul des indicateurs d'impacts environnementaux, à savoir les gaz à effet de serre, l'énergie primaire, et les matériaux.

3.1. À partir des trois matrices A, B, C représentant respectivement la technosphère (**A**ctivités), la **B**iosphère, et les facteurs de **C**aractérisation, il est possible de calculer les impacts de cycle de vie de la manière suivante :

- a. Calcul de l'inverse de Leontief, qui contient tous les flux nécessaires à la demande finale de chaque activité (*kg acier, l diesel, kWh éolien, ... par unité de demande finale*)

$$L = (I - A)^{-1}$$

Dans Excel, la matrice identité *I* se construit avec la fonction **MUNIT**, et l'inverse se calcule avec **MINVERSE**. Multiplier des matrices se fait grâce à la fonction **MMULT**.

- b. Calcul de l'inventaire des flux élémentaires (*kg CO<sub>2</sub>, kg CH<sub>4</sub>, ... par unité de demande finale*)

$$E = BL$$

- c. Calcul des impacts de cycle de vie (*kg CO<sub>2</sub> eq. par unité de demande finale*)

$$D = CE$$

3.2. Produire un graphique montrant les trois catégories d'impact (empreinte GES, empreinte fossile, empreinte matérielle). Vous pouvez choisir le mix électrique que vous souhaitez.

### 4. Interprétation

4.1. Analyse de contribution

Produire le même graphique que dans la question 3.2, **en distinguant les différentes phases du cycle de vie** : production du véhicule, production de la batterie, production du carburant/de l'électricité, utilisation du véhicule

4.2. Analyses de sensibilité

Maintenant que le calcul est établi, il est intéressant de faire varier les paramètres.

Proposer une analyse de sensibilité en modifiant :

- Consommation des véhicules,
- Mix électriques
  - quelle différence y a-t-il à utiliser de l'électricité Allemande ou française ?
    - ...pour l'utilisation du véhicule ?
    - ...pour la production de la batterie ?
  - Les mix électriques évoluant dans le temps, que peut-on espérer de la décarbonation du mix allemand ? français ? que devient la différence d'empreinte carbone entre les deux véhicules ?
- Poids à vide, durée de vie...

Que déduire de ces analyses ? y a-t-il intérêt à changer de véhicule fréquemment ? pour une motorisation thermique ? pour une motorisation électrique ?

Quelles sont les limites de l'étude ? Quelles hypothèses avons-nous exclues ? (dégradation de la batterie ? borne de recharge ? maintenance électrique/thermique ? etc.)

**BONUS :** aller chercher les informations de véhicules existants (poids à vide, capacité de la batterie, consommation estimée) et en estimer les impacts environnementaux (GES, énergie, matériaux). Choisir différents segments (citadine, SUV...) et comparer les motorisations.