



« Analyse du
Cycle de Vie du kWh
nucléaire EDF – parc
France »

SFRP, 15 juin 2023

Denis Le Boulch, Ingénieur Senior EDF R&D

Sommaire

1. Analyse du Cycle de Vie (ACV)

1. ACV du kWh nucléaire EDF France





Faisabilité technique et évaluation économique ne suffisent plus => dimension (socio)environnementale



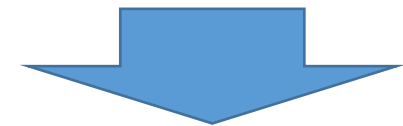
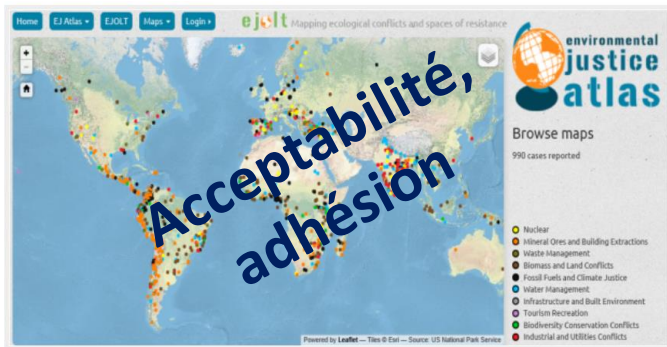
Arguments quantifiés et opposables ?

12

L'ANALYSE ENVIRONNEMENTALE

12.1 L'objet du volet environnemental des « Futurs énergétiques 2050 » : analyser les caractéristiques environnementales des scénarios

12.1.1 Tous les modes de production, acheminement ou consommation ont une incidence sur l'environnement



ACV

UNE METHODE LARGEMENT UTILISEE



Résultats de l'ACV pour le béton

- 1) Consommation d'énergie renouvelable:**
Consommation limitée compensée par les gains qu'il permet d'obtenir sur la vie du bâtiment.
- 2) Consommation de ressources non énergétiques:**
Granulats abondants.
- 3) Consommation d'eau:**
Eau de gâchage compensée par les eaux condensées et condensées dans les ouvrages en béton.
- 4) Déchets valorisés:**
Laines, Cendres volantes.

↳ Résultats de l'ACV pour le béton



bio intelligence Service

Organisations professionnelles du lin

Analyse de Cycle de Vie comparée d'une chemise en lin et d'une chemise en coton

Rapport final post revue critique (décembre 2011)

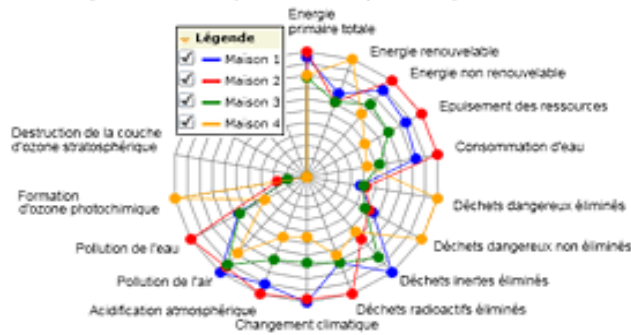


Analyse de Cycle de Vie appliquée aux biocharbonnets de première génération consommés en France

Rapport final



Répartition des impacts annuels pour chaque bâtiment



LE CYCLE

1 La vie automobile

2 La seconde vie

3 Le recyclage

EN LOUANT LES BATTERIES DE SES VÉHICULES ÉLECTRIQUES, RENAULT AGIT DIRECTEMENT SUR LEUR CYCLE DE VIE

Ecodié

Consommation d'énergie (Dossier + D55)**

Performances environnementales du bâtiment

Matériaux et produits (Gries, Oxydes + D55)**

CSTB



L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV)

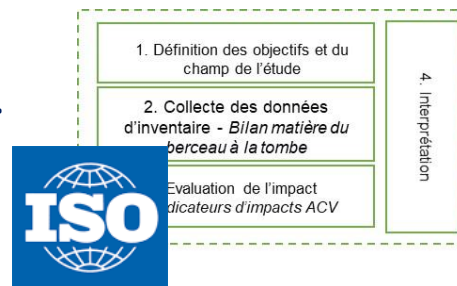
UNE SCIENCE JEUNE, MAIS QUI FAIT DÉJÀ REFERENCE

Historique

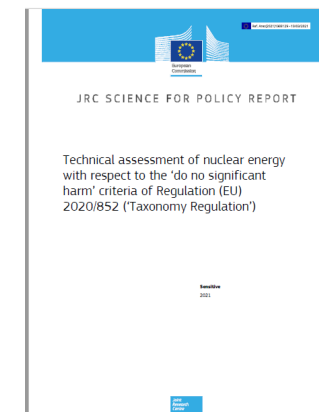
- Première ACV en 1969 (Coca Cola) => **Objectiver les bilans environnementaux**
- 1974, choc pétrolier => bilan énergie
- 1992, Rio, changement climatique => bilans carbone/GES (gaz à effet de serre)

Dès 1997, cadrage normatif fort

ISO 14040-44



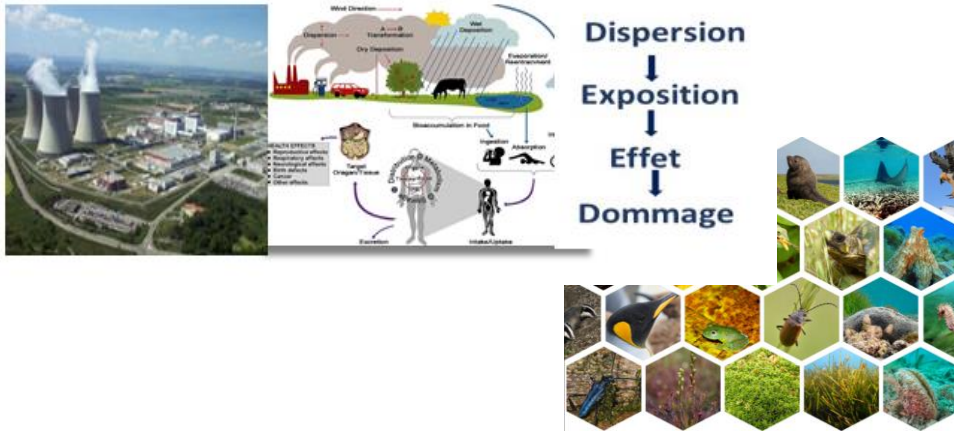
Résultats quantifiés et opposables => large utilisation



EVALUATION ENVIRONNEMENTALE PRODUIT

UN CHAMP D'ACTION COMPLEMENTAIRE DES APPROCHES LOCALES

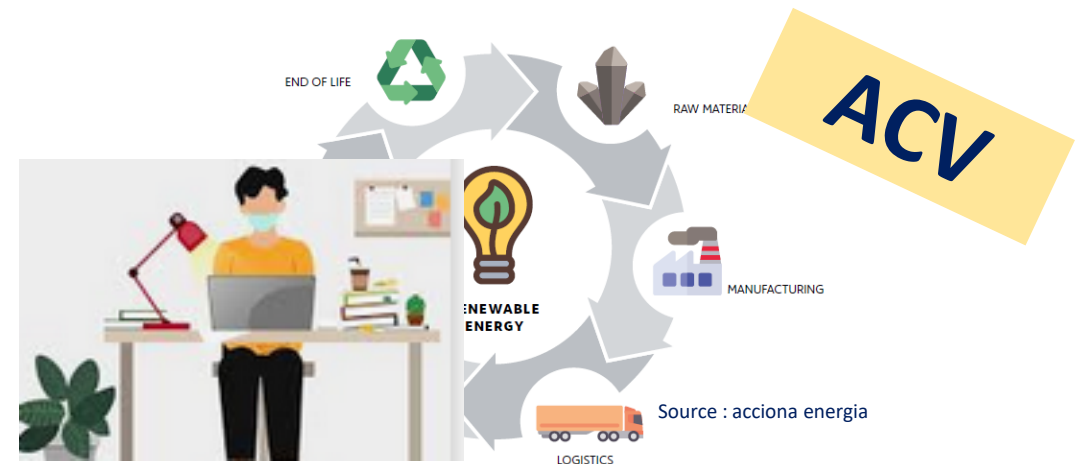
Loi
Conformité réglementaire



Impacts locaux
Biosphère

Disciplinaire environnement

Communication environnementale volontaire
Ecoconception, finances durables



Chaine de valeur
Technosphère

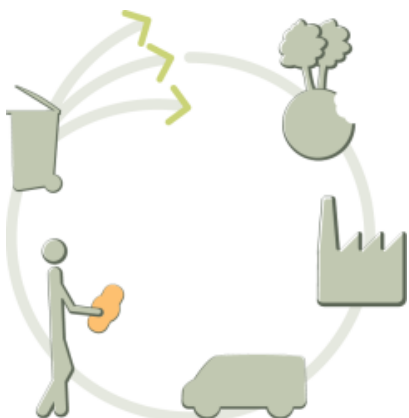
Référentiels normatifs



TROIS CARACTERISTIQUES MAJEURES :

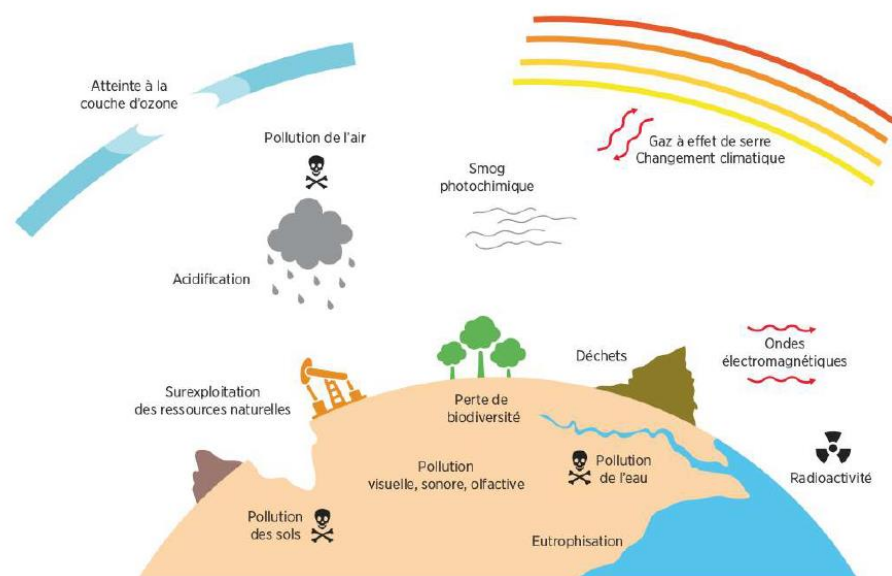
CYCLE DE VIE

(approche systémique ; échelle produit)



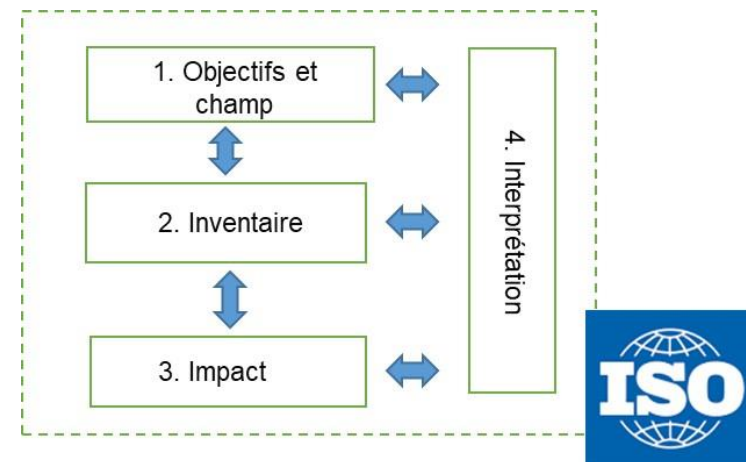
Du « berceau à la tombe »
Capte les transferts de pollution entre étapes

MULTICRITERE



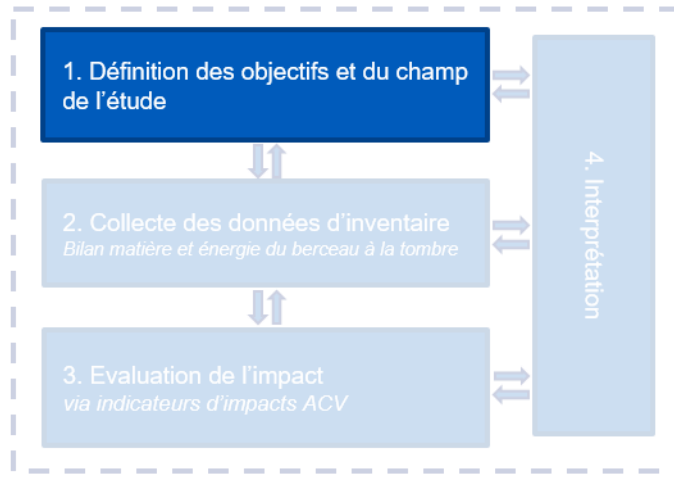
Indicateur de management et d'évaluation
Capte les transferts de pollution entre impacts

NORMALISEE et INTEGREE



ISO 14040-44

L'ACV, EN PRATIQUE ... (1/4)



Etape 1. Objectifs et champ de l'étude

Définir son objet d'étude : 1 kWh ou 1 kWh EDF ?

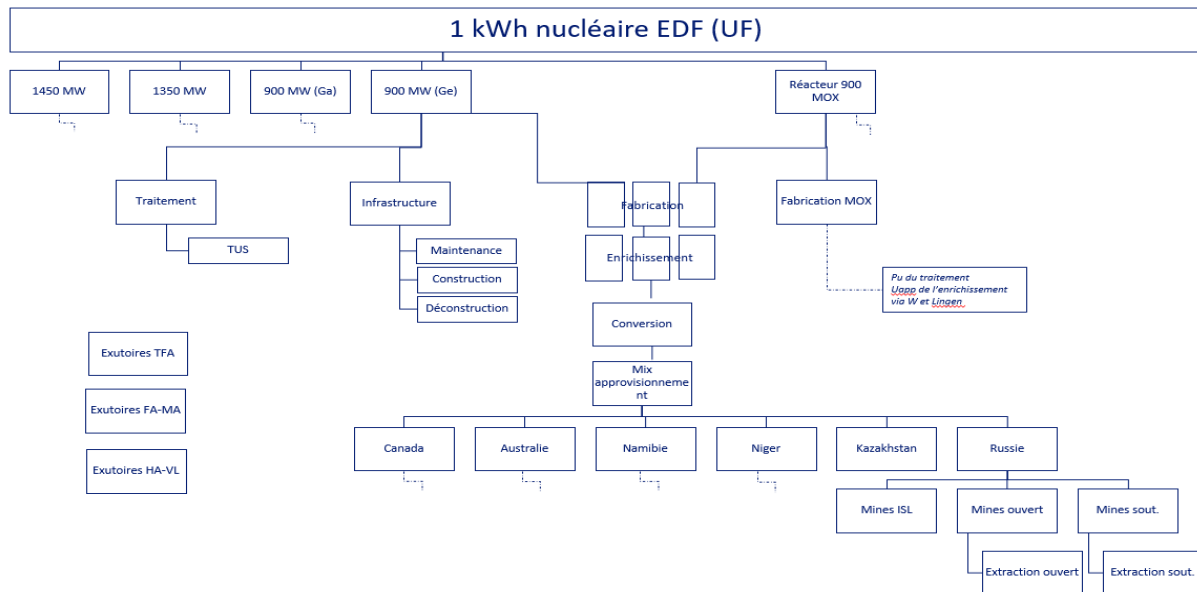
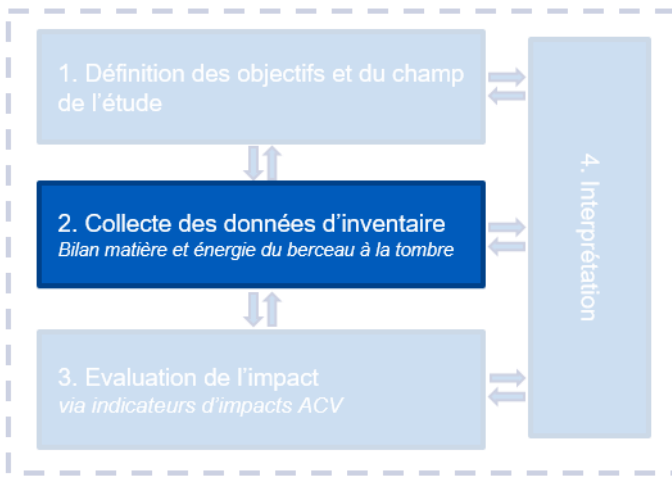
Définir ses objectifs : internes, ou communication au grand public ?

Choisir ses indicateurs (cf phase 3)

L'ACV, EN PRATIQUE ... (2/4)

Etape 2. « Inventaire »

- Définir un arbre des procédés
- Collecter des données (jamais disponibles sur étagère !)
- Utiliser les outils ACV



SimaPro



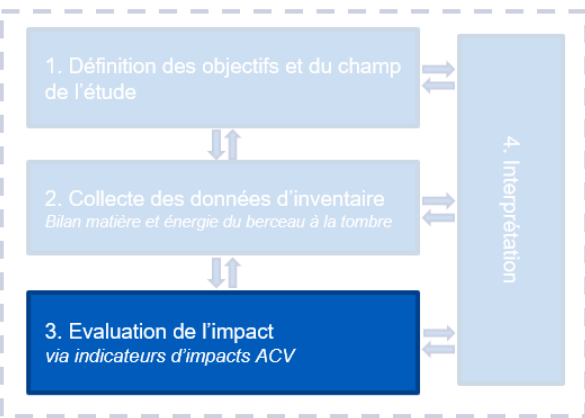
L'ACV, EN PRATIQUE ... (3/4)

Etape 3. Impacts

$$Impact_i = \sum_x F_x \cdot CF_{x-i}$$

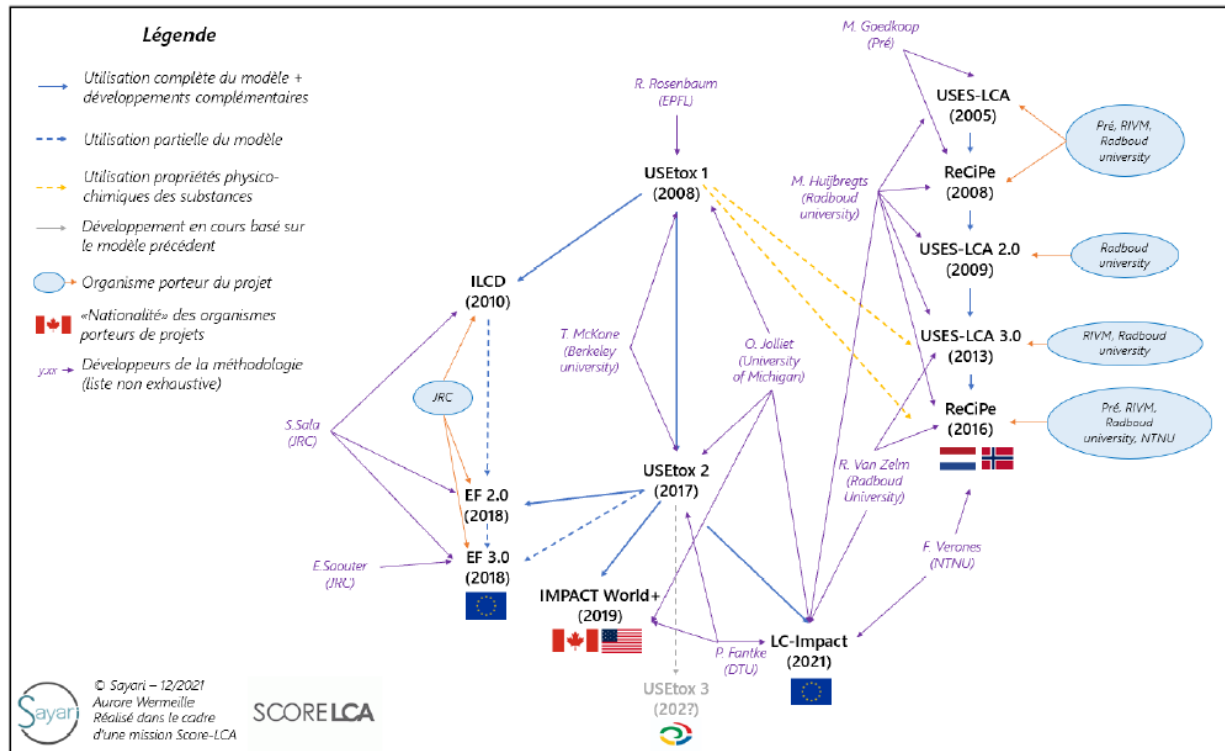
Avec :

- F_x flux de la substance x
- CF_{x-i} facteur de caractérisation pour la substance x et l'impact i

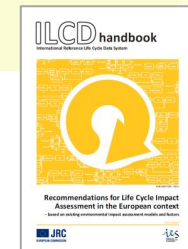


Profusion de « recettes » ...

... doctrine R&D



| Niveau | I | Climate change Ozone depletion Particulate matter / Respiratory inorganics | kg CO2 eq. / kWh kg CFC-11 eq. / kWh kg PM2.5 eq. / kWh |
|--------|----|--|---|
| | II | Ionising radiation, human health Photochemical ozone formation Acidification Eutrophication, terrestrial Eutrophication, aquatic, freshwater Eutrophication, aquatic, marine Resource depletion, mineral | kg U235 eq. / kWh kg NMVOC eq. / kWh mol H+ eq. / kWh mol N eq. / kWh kg P eq. / kWh kg N eq. / kWh kg Sb eq. / kWh |

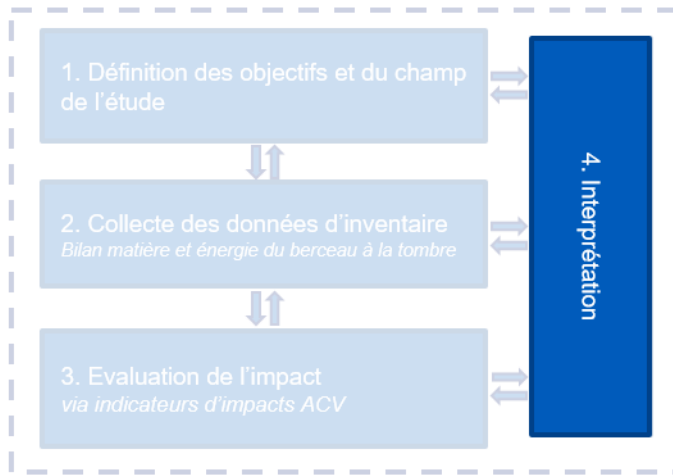


L'ACV, EN PRATIQUE ... (4/4)

Etape 4. Interprétation

Etudes de sensibilité, analyse multicritère, note unique, etc.

Si besoin, complément de collecte (l'ACV est une méthode *intégrée*)



- Résultats
 - Une quantification de la performance environnementale : identification des étapes prédominantes, des leviers d'amélioration etc.
 - Des possibilités de communications

LES DEUX OBJECTIFS D'UNE ACV

Ouvrir de nouvelles options
(*écoconception*)



Argumenter pour participer aux débats
(*communication*)

Empreinte
environnementale

ACV : aide à la décision

La métrique d'une communication environnementale responsable

Sommaire

1. Analyse du Cycle de Vie (ACV)

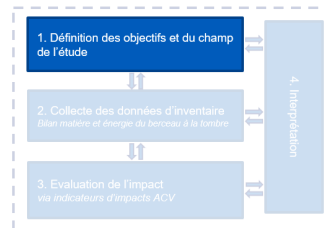
1. ACV du kWh nucléaire EDF France



EDF affirme sa raison d'être dans ses statuts

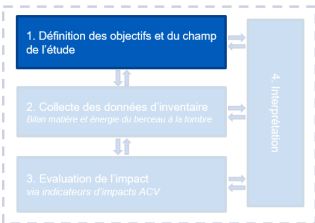
« construire un avenir énergétique neutre en CO₂, conciliant préservation de la planète, bien-être et développement, grâce à l'électricité et à des solutions et services innovants ».





Objectifs de l'étude

- > L'étude s'inscrit dans un objectif de management environnemental. Elle vise une meilleure compréhension des contributions de chaque étape du cycle, permettant ainsi d'identifier les meilleures actions d'amélioration environnementale à initier et réaliser sur la chaîne de valeur.
- > *L'Analyse du Cycle de Vie du kWh nucléaire EDF SA en France porte sur le parc actuel.*
- > *Elle a fait l'objet d'une revue critique par un panel d'experts indépendants*



Champ de l'étude



« Produire un kWh à partir du parc nucléaire français EDF »

Les données retenues sont celles de 2019 soit l'ensemble des moyens du parc de production nucléaire d'EDF SA en France en 2019,

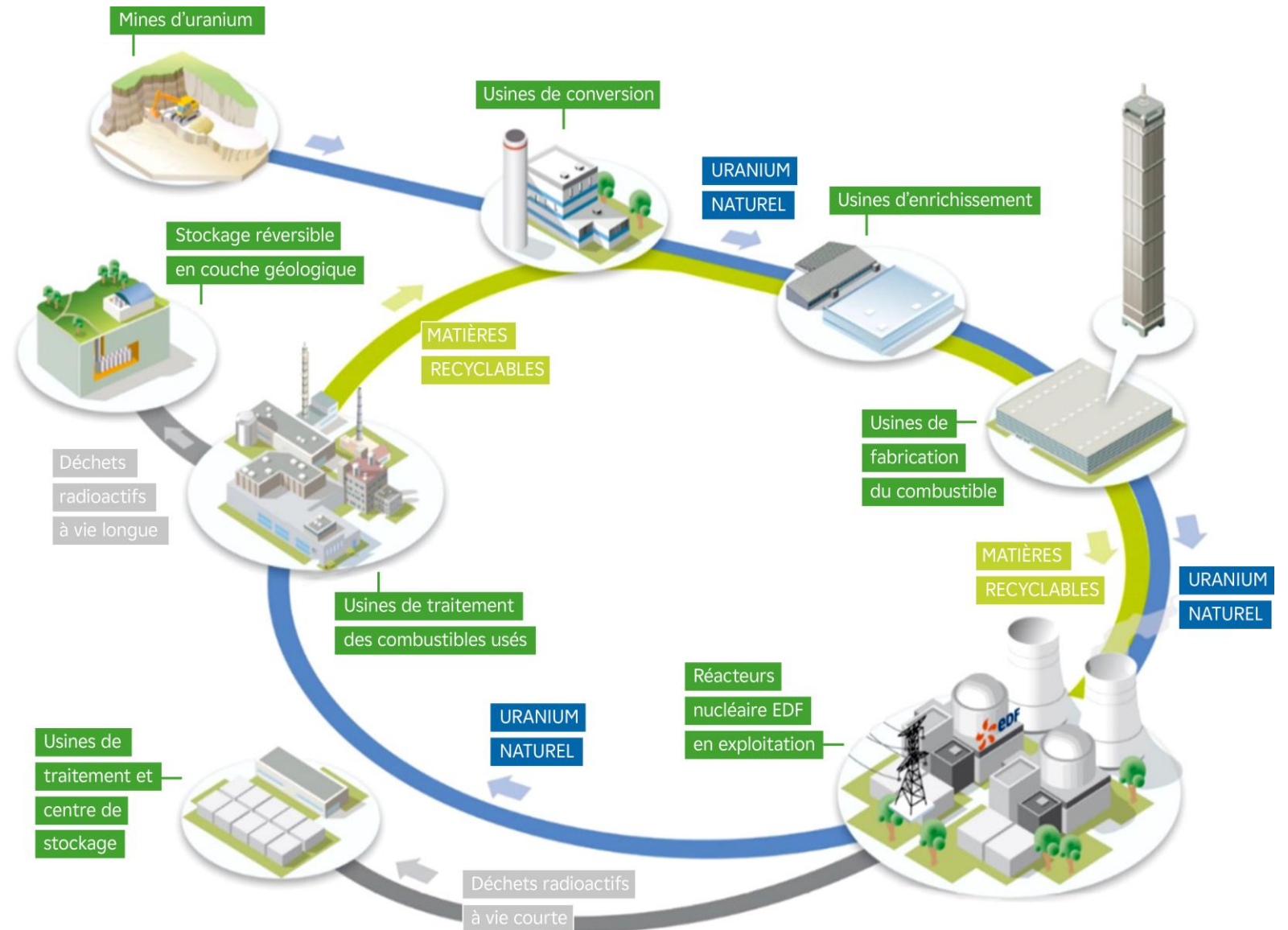
- 34 réacteurs 900 MW (dont 22 « moxés »),
- 20 réacteurs 1300 MW,
- 4 réacteurs de 1450 MW.

Elle prend donc en compte la production des deux tranches de Fessenheim, arrêtées en 2020.

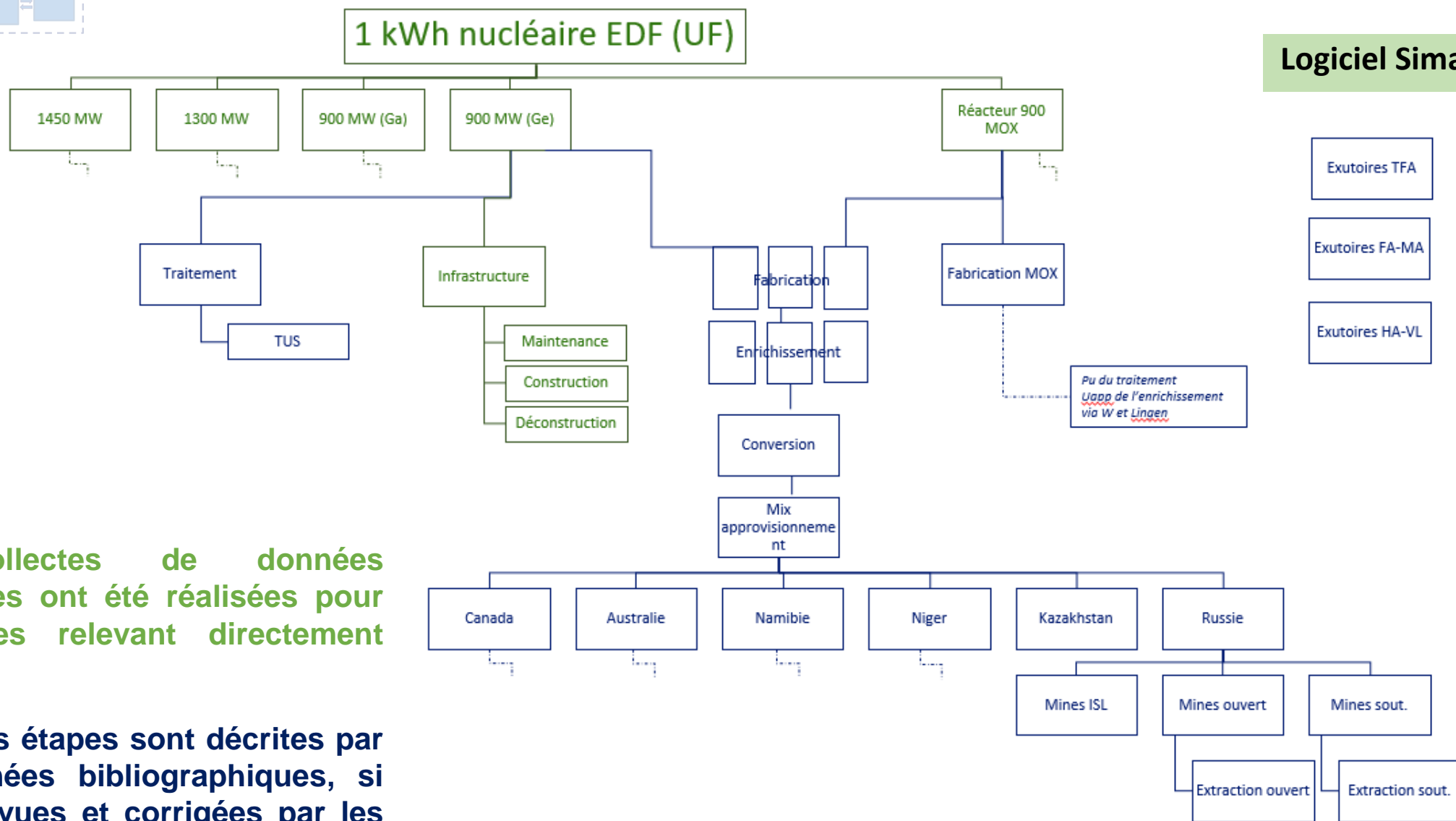
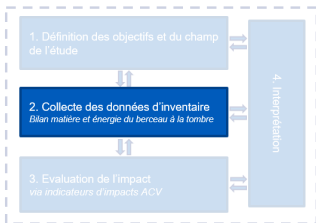
Le kWh est destiné à alimenter un réseau de production centralisé. L'étude ne prend pas en compte le transport de l'électricité.



Le cycle de vie du kWh nucléaire EDF

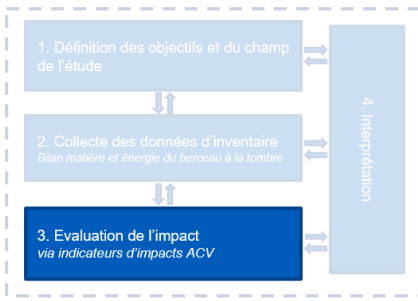


Etape 2 : modélisation du cycle de vie



Des collectes de données spécifiques ont été réalisées pour les étapes relevant directement d'EDF.

Les autres étapes sont décrites par des données bibliographiques, si besoin revues et corrigées par les experts EDF



Etape 3 : évaluation de l'impact

L'inventaire ACV obtenu a été interprété avec 10 indicateurs ACV

| | Indicateur | Unité |
|----------|---|------------------------|
| Niveau 1 | Climate change | kg éq. CO ₂ |
| | Ozone depletion | kg CFC-11 éq. |
| | Particule matter/respiratory inorganics | kg PM2.5 éq. |
| Niveau 2 | Ionising radiation, human health | kg U235 éq. |
| | Photochemical ozone formation | kg NMVOC éq. |
| | Acidification | mol H+ éq. |
| | Eutrophication, terrestrial | mol N éq. |
| | Eutrophication, aquatic, freshwater | kg P eq. |
| | Eutrophication, aquatic, marine | kg N eq. |
| | Resource depletion | kg Sb éq. |



Les thématiques « eau » et « déchets » sont traitées par des approches spécifiques.

Livrable : rapport respectant le formalisme ISO



Présentation du cycle
Rappels sur la méthode
Objectifs de l'étude
Applications envisagées
Unité fonctionnelle, périmètre
Données
Choix des indicateurs
Description du modèle
Résultats
Analyse des résultats
Fiabilité des résultats
Etudes de sensibilité
Complétude
Revue critique

| | |
|---|----|
| Sommaire / Summary | |
| AVERTISSEMENT / CAUTION | 1 |
| SYNTHÈSE | 2 |
| SOMMAIRE / SUMMARY | 8 |
| 1. INTRODUCTION | 8 |
| 2. PRÉSENTATION DE LA FILIÈRE ÉLECTRONUCLEAIRE EDF | 8 |
| 2.1. GÉNÉRALITÉS SUR LA FILIÈRE | 8 |
| 2.2. L'EXTRACTION DU MINÉRAU D'URANIUM | 9 |
| 2.3. LA CONCENTRATION (APPELÉ AUSEI TRAITEMENT) | 9 |
| 2.4. LA CONVERSION | 10 |
| 2.5. L'ENRICHISSEMENT | 11 |
| 2.6. LA FABRICATION DU COMBUSTIBLE | 12 |
| 2.7. LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ | 13 |
| 2.8. LE RETRAITEMENT DU COMBUSTIBLE USE | 15 |
| 2.9. LA FILIÈRE MOX | 18 |
| 2.10. LE STOCKAGE DES DÉCHETS NUCLEAIRES | 18 |
| 3. RAPPELS SUR L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) | 17 |
| 3.1. PRINCIPES ET GÉNÉRALITÉS | 17 |
| 3.2. MÉTHODE | 17 |
| 4. DÉFINITION DE L'OBJETIF | 19 |
| 4.1. OBJECTIF DE L'ÉTUDE | 19 |
| 4.2. APPLICATION ENVISAGÉE DE L'ÉTUDE ET PUBLIC CONCERNÉ | 19 |
| 5. CHAMP DE L'ÉTUDE | 19 |
| 5.1.1. Fonction et unité fonctionnelle | 19 |
| 5.1.2. Frontières du système | 19 |
| 6. INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE ET ANALYSE DE L'INVENTAIRE | 24 |
| 6.1.1. Sources de données et hypothèses pour les données primaires et secondaires | 24 |
| 6.1.2. Généralités sur les données | 24 |
| 6.1.3. Données cycle | 25 |
| 6.1.4. Exigences en matière de qualité des données et méthode d'évaluation | 27 |
| 7. ÉVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX | 32 |
| 7.1.1. Méthodologie de caractérisation des impacts environnementaux (indicateurs ACV/LCD) | 32 |
| 7.1.2. Autres indicateurs et thématiques environnementales | 32 |
| 7.1.3. Description du modèle relatif | 32 |
| 7.1.4. Analyses de contribution | 32 |
| 7.1.5. Analyses de sensibilité | 32 |
| 7.1.6. Revue critique | 32 |
| 8. RÉSULTATS | 34 |
| 8.1. ÉVALUATION DE L'IMPACT DU CYCLE DE VIE – SYNTHÈSE DES RÉSULTATS | 34 |
| 9. ANALYSE DES RÉSULTATS | 35 |
| 9.1. ANALYSE DES FLUX | 35 |
| 9.2. ANALYSE DES INDICATEURS D'IMPACT POTENTIEL | 36 |
| 9.3. SYNTHÈSE | 36 |
| 9.3.1. ÉTUDES DE SENSIBILITÉ | 39 |
| 9.3.2. Fiabilité des résultats GES | 39 |
| 9.3.3. Étude de scénarios | 39 |

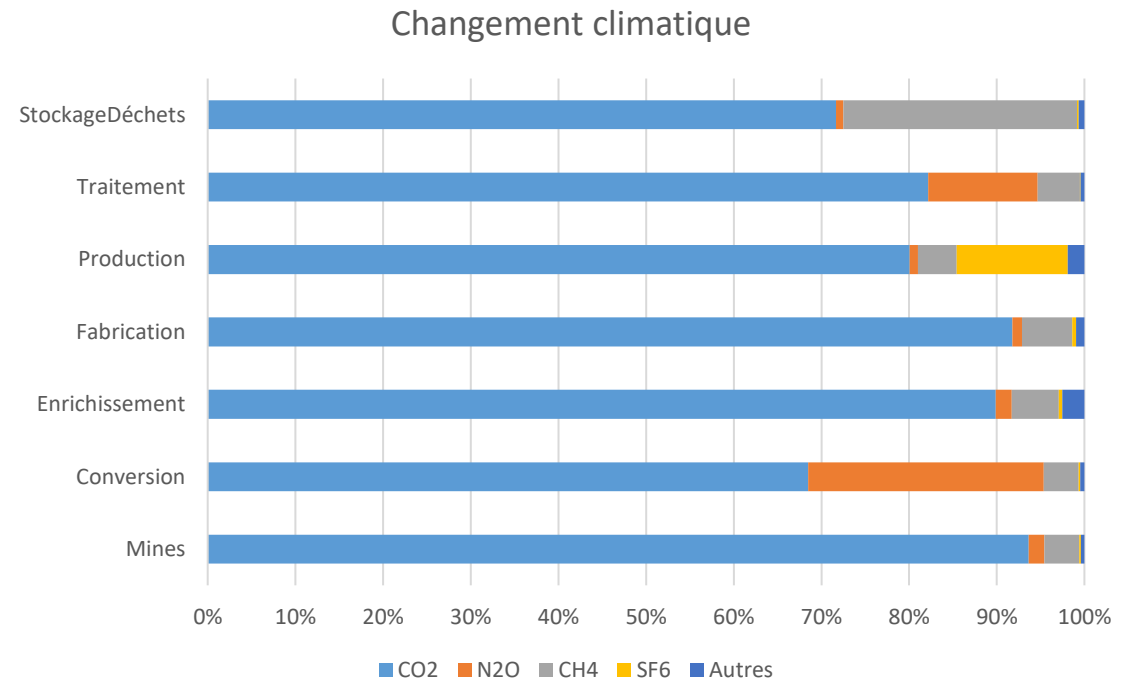
| | | |
|----------|-----------------------------|-------------|
| LOGO EDF | PROJET DE RAPPORT D'ANALYSE | LOGO EDF SA |
| | | Version 1.0 |

| | |
|---|----|
| 9.4. VÉRIFICATION | 51 |
| 9.4.1. Contrôle de complétude | 51 |
| 9.4.2. Incertitudes et limites de l'étude | 52 |
| 10. CONCLUSION - PERSPECTIVES | 53 |
| 11. ANNEXES | 58 |
| 12. BIBLIOGRAPHIE | 73 |
| 13. FIGURES ET TABLEAUX | 74 |
| 14. ABRÉVIATIONS | 78 |

Indicateur changement climatique : résultats

=> 4 g eq CO₂/kWh

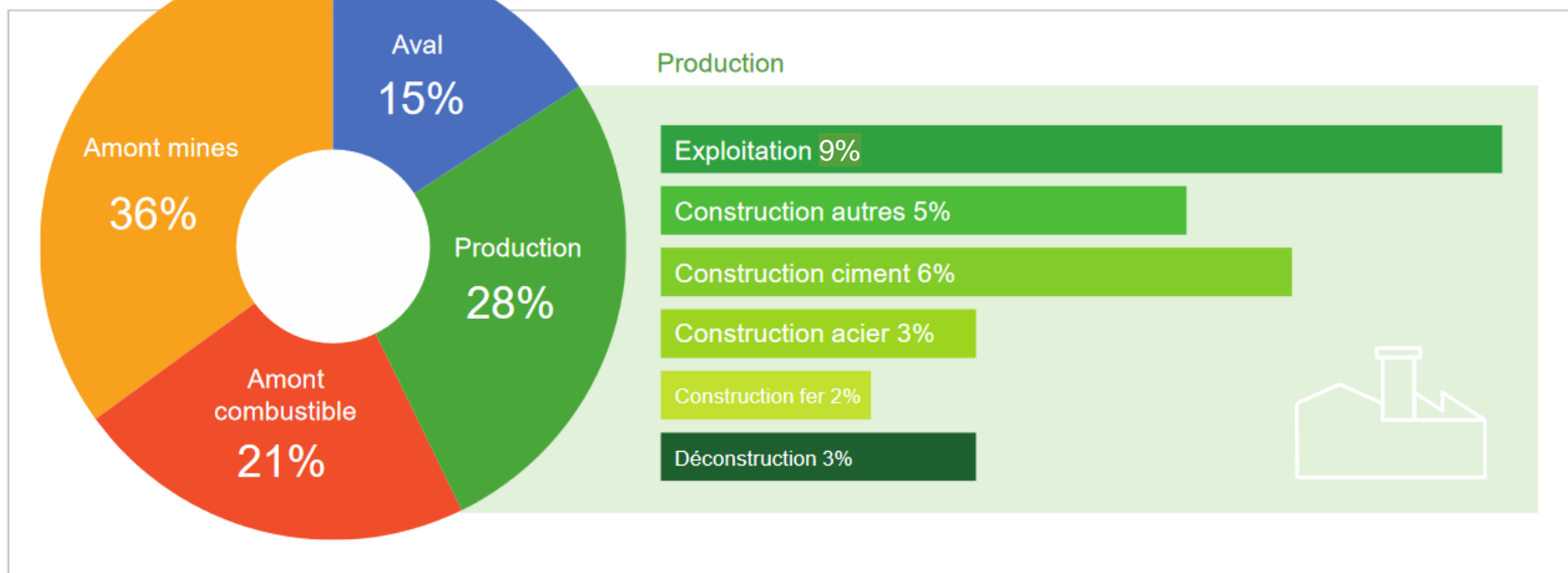
| Etape | G <u>eq</u> CO ₂ /kWh |
|-----------------------------|----------------------------------|
| Mines - traitement | 1,3 |
| Conversion | 0,3 |
| Enrichissement | 0,4 |
| Fabrication | 0,1 |
| Production - construction | 0,6 |
| Production - exploitation | 0,3 |
| Production - déconstruction | 0,1 |
| Traitement CU | 0,5 |
| Stockage déchets | 0,1 |
| TOTAL | 3,7 |



Zoom « Production »

La réalisation d'une ACV interne permet :

- De disposer d'un référentiel d'analyse quantifié, identifiant les étapes et flux les plus contributeurs au bilan global ...
- ... qui sera largement diffusé ...
- ... et permettra l'amélioration.





Etape 4 : études de sensibilité

Consommation diesel mine => < **13 %**



| Origine | g éq CO ₂ /kWh |
|-------------------------------|---------------------------|
| Cas actuel | 3,7 |
| Consommation diesel optimisée | 3,5 |
| Consommation diesel dégradée | 3,95 |

DF de 40 à 60 ans => - **8 %**

| Durée de fonctionnement | g eq CO ₂ /kWh |
|-------------------------|---------------------------|
| 40 ans | 3,7 |
| 60 ans | 3,4 |



Variation de production de 10 %
=> **3 %**



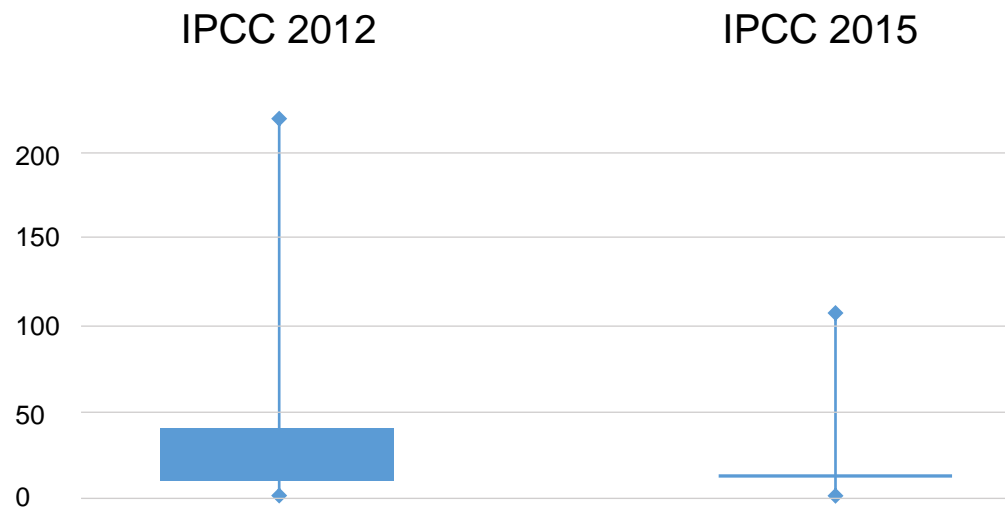
| Production annuelle | g eq CO ₂ /kWh |
|-------------------------------------|---------------------------|
| Baisse 10 % (342 148 844 MWh) | 3,8 |
| Cette étude (380 165 383 MWh) | 3,7 |
| Augmentation 10 % (418 181 921 MWh) | 3,6 |

| Paramètre | A | Cette étude | B |
|--|-----------------------------------|--------------|---------------------------------|
| Consommation de diesel | Optimisé | Cette étude | Dégradé |
| Électricité enrichissement | 0,0864 kg eq CO ₂ /kWh | Mix EDF 2019 | 0,71 kg eq CO ₂ /kWh |
| Durée de fonctionnement centrale | 60 ans | 40 ans | 40 ans |
| Bilan GES (g eq CO₂/kWh) | 3.2 | 3.7 | 4.0 |

SENSIBILITE GLOBALE => de 2,9 à 4,6 g eq CO₂/kWh

Indicateur changement climatique : des résultats convergents (contrôle de fiabilité)

Résultats GIEC (échelle monde)



12 g eq CO₂/kWh

ACV France



6 g eq CO₂/kWh

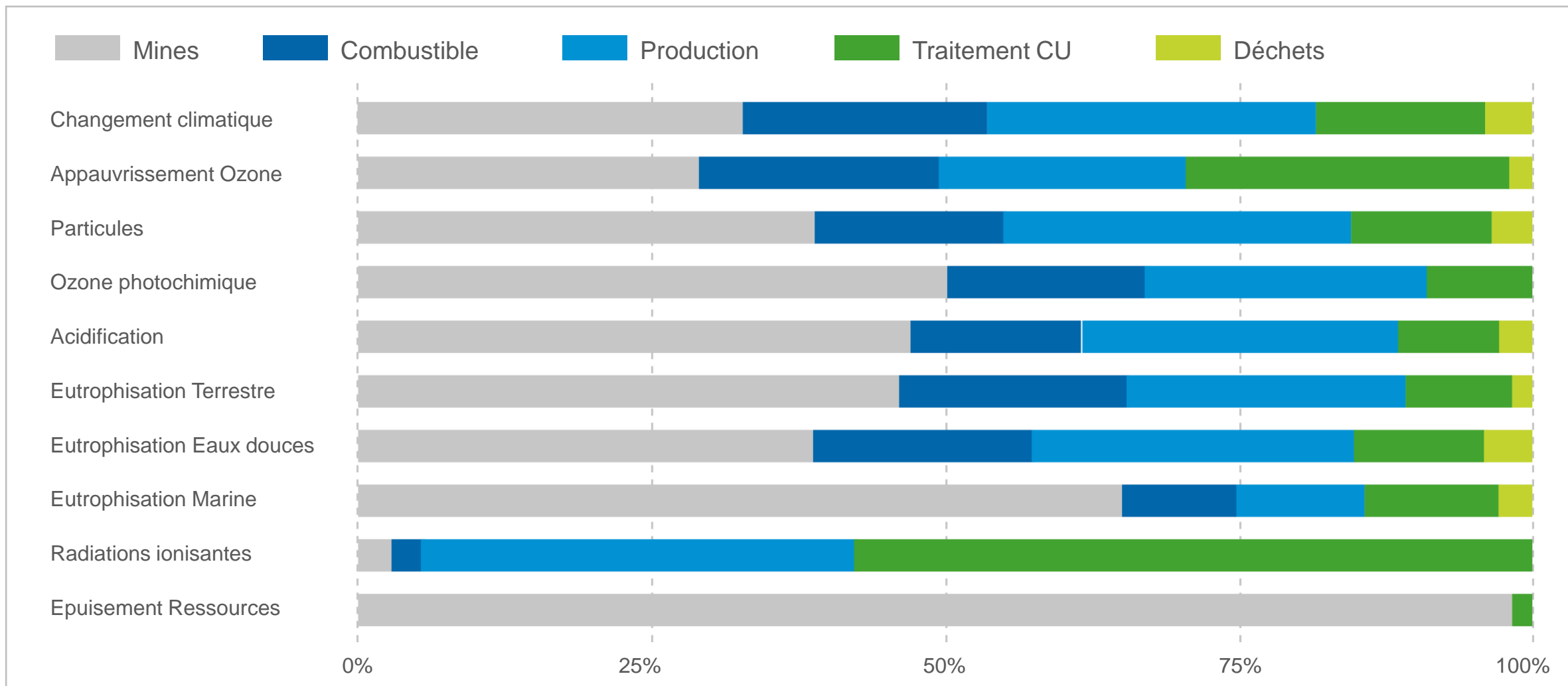


5 g eq CO₂/kWh



4 g eq CO₂/kWh

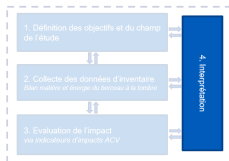
Résultats de l'analyse multicritère



Production = construction + exploitation + maintenance

Revue critique, par Panel

Les experts ont été choisis pour leur complémentarité afin de constituer un panel approprié aux exigences d'ISO 14044 et ISO/TS 14071.



Philippe Osset et Delphine Bauchot
(Solinnen)



Alain Grandjean et Aurélien Schuller (Carbone 4)



Christophe Poinssot
(BRGM).

L'étude a fait l'objet de 252 commentaires détaillés

- Tous les commentaires ont été pris en compte par EDF.
- La pertinence des modifications proposées a été discutée lors de plusieurs réunions.
- La réalisation effective des modifications a été vérifiée au vu du rapport final d'ACV.





La conclusion de la revue critique

Le panel note la globale bonne volonté d'EDF qui a apporté dans la majorité des cas des modifications en direct adéquation avec les commentaires de la Revue Critique.

Au vu du rapport final d'ACV, **les experts considèrent que les résultats apportés répondent de façon adéquate et crédible aux objectifs mentionnés, et qu'ils ont été établis dans le respect des normes mentionnées.** Ces conclusions sont mesurées dans le cadre explicitement mentionné au chapitre 9.5.2 du rapport d'ACV d'EDF. Ces conclusions s'inscrivent dans le cadre des limitations mentionnées au sein des commentaires détaillés précisés au chapitre suivant.

Communication / valorisation

- **L'étude est en accès libre**

<https://www.edf.fr/groupe-edf/produire-une-energie-respectueuse-du-climat/lenergie-nucleaire/notre-vision/analyse-cycle-de-vie-du-kwh-nucleaire-dedf>

- **Multiples valorisations internes – l'ensemble du Groupe s'approprie la vision élargie apportée par l'ACV**

- **Colloque SFEN « le nucléaire énergie bas carbone » - 16 juin 2022**

<https://www.youtube.com/watch?v=HrJTC5Aokjs>

Perspectives

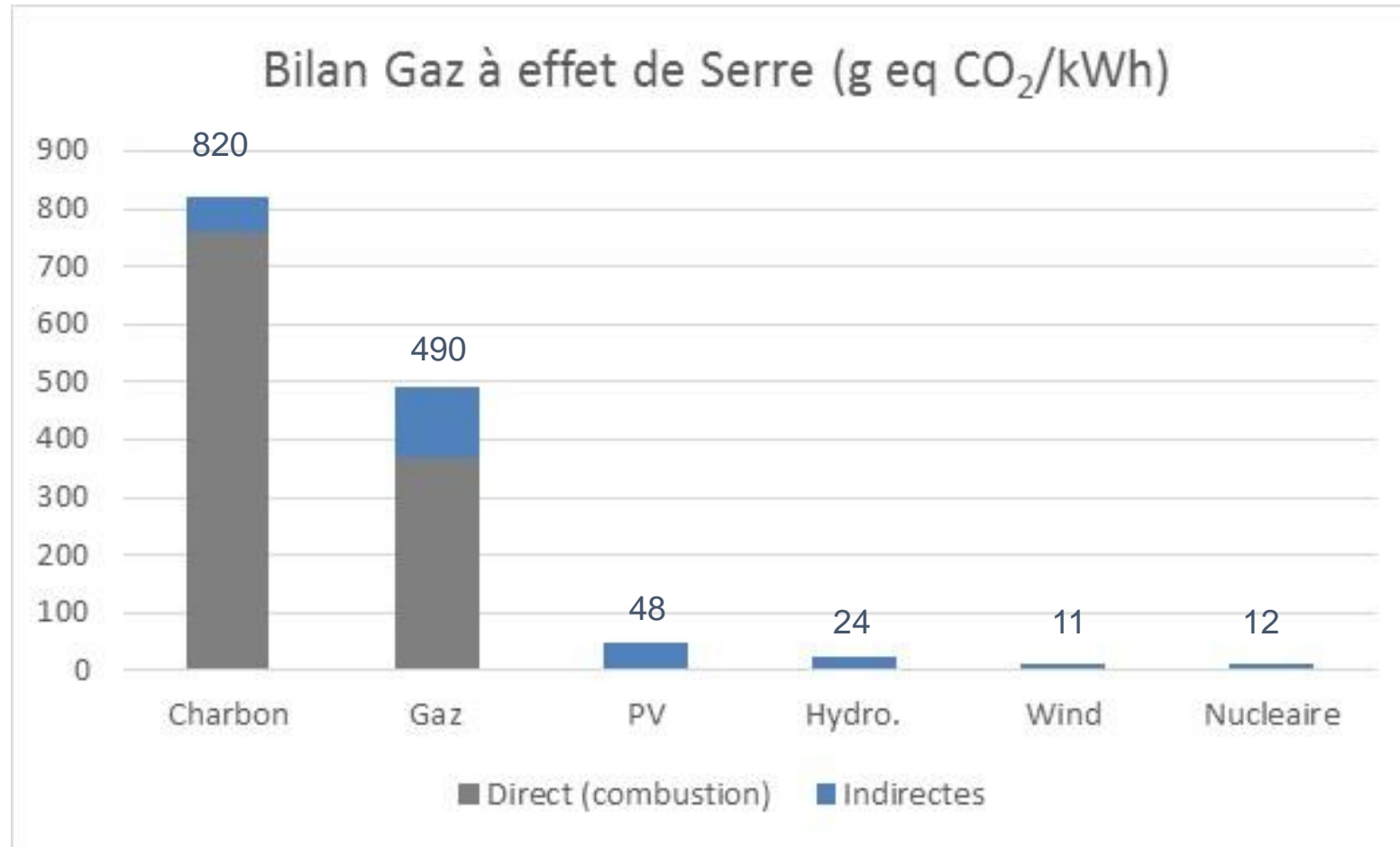
- > Impliquer les acteurs amont et aval, y compris les sous-traitants, pour renforcer les résultats et leur analyse
- > Renforcer la prise en compte des thématiques environnementales, avec les derniers indicateurs disponibles (eau, occupation des sols)
- > Proposer des évolutions pour les indicateurs spécifiques à la filière (exemple : radiations ionisantes) et / ou encore en développement (exemple : biodiversité)



Merci de votre
attention,
et de vos questions !



RESULTATS POUR LES FILIERES ELECTRIQUES

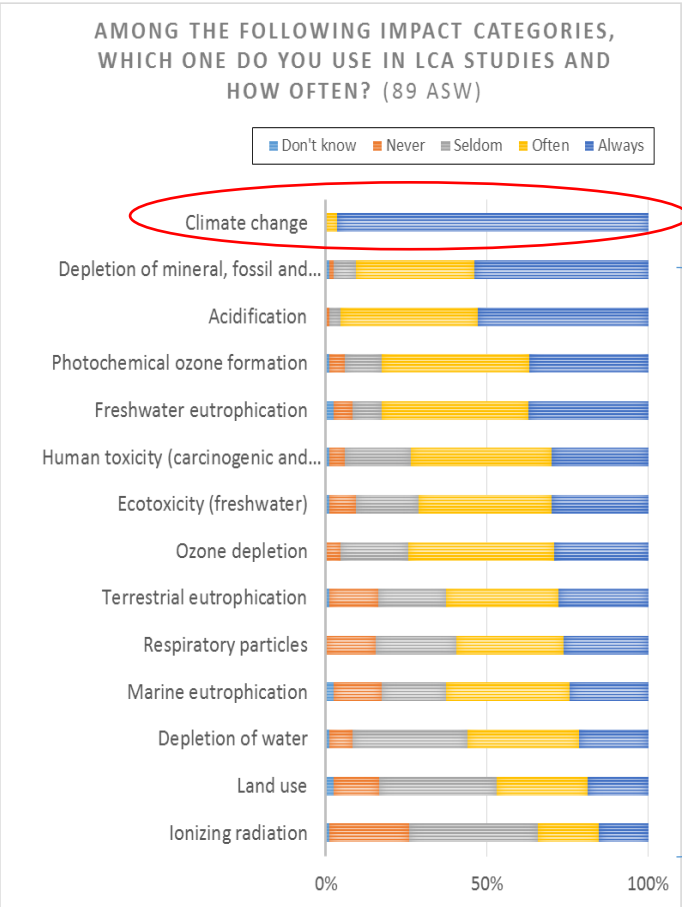


Source : revue de littérature IPCC, 2015

UNE METHODE A DOUBLE FACE

**OPERATIONNELLE,
pour le management environnemental**

**DE RECHERCHE,
pour l'évaluation**



**GES : management
& évaluation**

**Management
(Auditeurs ISO 14001)**

- ACV attributionnelle, conséquentielle, prospective, dynamique etc.
- Développement de nouveaux indicateurs ...
- Outils et base de données etc.
- Développement durable, écoconception, neutralité carbone etc.
- Données sectorielles pour thématiques spécifiques etc.
- etc.

Int J Life Cycle Assess (2014) 19:1674–1685

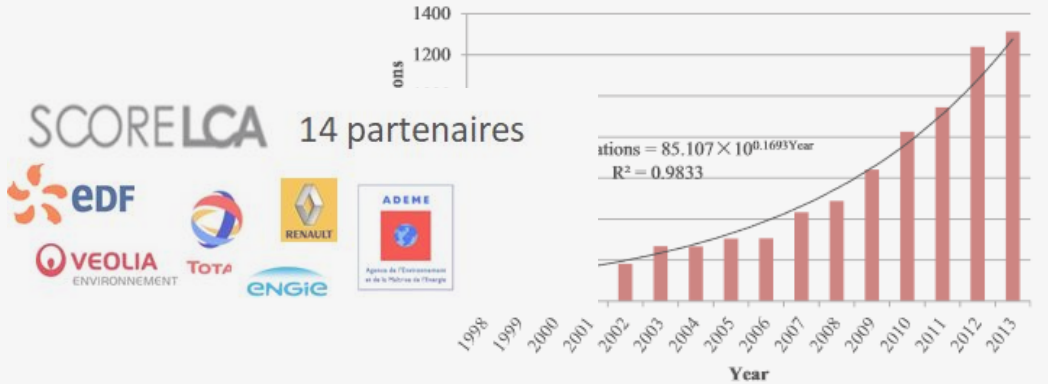
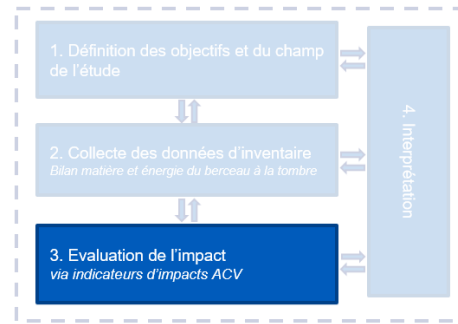


Fig. 1 Chronological distribution of life cycle assessment research-related articles in Web of Science (1998–2013)

L'indicateur ACV « Radiations ionisantes »

L'ACV est une méthode intégrée => *objectif phase 3 : réduire l'« inventaire ACV » de la phase 2 en une seule grandeur*



$$Impact_i = \sum_x F_x \cdot CF_{x-i}$$

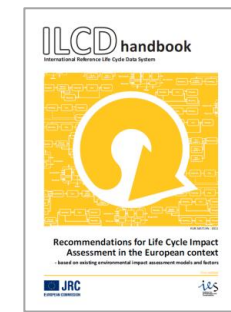
Avec :

- F_x flux de la substance x
- CF_{x-i} facteur de caractérisation pour la substance x et l'impact i

- L'étude EDF utilise la **méthode*** ILCD

* une *méthode ACV est un jeu d'indicateur*

| | | |
|-----------------------------|---|----------------------------|
| Niveau I | Climate change | kg CO2 eq. / kWh |
| | Ozone depletion | kg CFC-11 <u>ég.</u> / kWh |
| | Particulate matter / Respiratory inorganics | kg PM2.5 <u>ég.</u> / kWh |
| Niveau II | Ionising radiation, human health | kg U235 <u>ég.</u> / kWh |
| | Photochemical ozone formation | kg NMVOC <u>ég.</u> / kWh |
| | Acidification | mol H+ <u>ég.</u> / kWh |
| | Eutrophication, terrestrial | mol N <u>ég.</u> / kWh |
| | Eutrophication, aquatic, freshwater | kg P eq. / kWh |
| | Eutrophication, aquatic, marine | kg N eq. / kWh |
| Resource depletion, mineral | kg Sb <u>ég.</u> / kWh | |



- L'enjeu « radiations ionisantes », spécifique, est peu traité en ACV. Comme la plupart des **méthodes ACV**, l'ILCD retient l'**indicateur** développé par Rolf Frischknecht en ... 2000



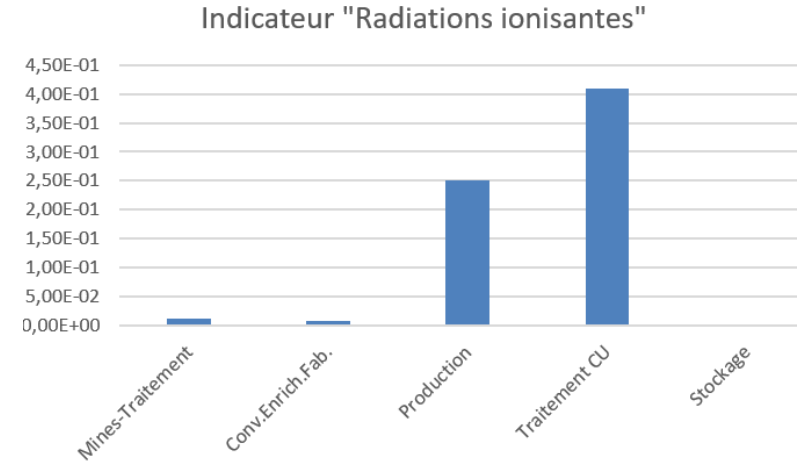
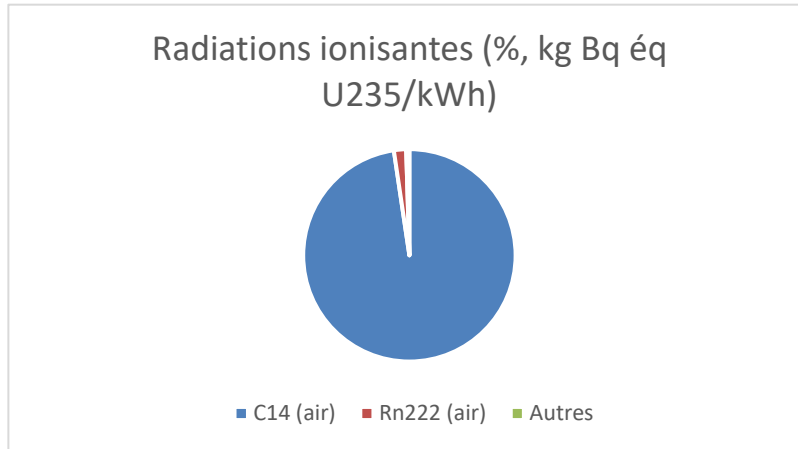
Feature article
Human health damages due to ionising radiation in life cycle impact assessment
R. Frischknecht^{a,b}, A. Braunschweig^b, P. Hofstetter^c, P. Suter^d

^aESU-services, Zentrstr. 8, CH-8610 Uster, Switzerland; ^bIWO-ESG, University of St. Gallen, Switzerland; ^cNatural and Social Science Interface, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland; ^dDepartment of Energy Technology, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland

Abstract
This paper describes the assessment of the human health damages related to the man-made routine releases of radioactive material to the environment as reported in Life Cycle Assessment (LCA). The fate and exposure analyses are based on...

L'indicateur ACV « Radiations ionisantes » (2/2)

- Il permet donc de ramener les émissions ionisantes de l'inventaire ACV (donc en Bq, sans caractéristiques spatio-temporelles) en « Bq eq U235 »



- Il est conditionné par les émissions de C14 à la production (37 %) et au traitement du combustible utilisé (60 %)
- L'étude EDF éclaire ces résultats sur l'impact des rejets de C14 à ces deux étapes.