

Analyse du Cycle de Vie

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



Le kWh nucléaire EDF émet 4 g équivalent CO_2

C’est le résultat d’une analyse du cycle de vie réalisée selon les normes, incluant l’ensemble du cycle de vie, et ayant fait l’objet d’une revue critique par un panel d’experts indépendants.

Une étude approfondie qui conforte le caractère bas carbone du kWh nucléaire

EDF affirme sa raison d'être dans ses statuts

« construire un avenir énergétique neutre en CO_2, conciliant préservation de la planète, bien-être et développement, grâce à l'électricité et à des solutions et services innovants ».



NEUTRALITÉ CARBONE & CLIMAT



- Une trajectoire carbone ambitieuse
- Des solutions de compensation carbone
- Adaptation au changement climatique
- Développement des usages de l'électricité et services énergétiques

BIEN ÊTRE & SOLIDARITÉ



- Santé et sécurité de tous
- Éthique et droits humains
- Egalité, diversité et inclusion
- Précarité énergétique et innovation sociale

PRÉSERVATION DES RESSOURCES DE LA PLANÈTE



- Biodiversité
- Gestion responsable du foncier
- Gestion intégrée et durable de l'eau
- Déchets & Economie Circulaire

DÉVELOPPEMENT RESPONSABLE



- Dialogue et concertation
- Développement responsable des territoires
- Développement des filières industrielles
- Numérique Responsable

L’analyse du cycle de vie (ACV)

Une science récente, qui fait déjà référence, avec trois caractéristiques majeures :

1. CYCLE DE VIE

(approche systémique ; échelle produit)



« Du berceau à la tombe »

Capte les transferts de pollution entre étapes

2. MULTICRITÈRE

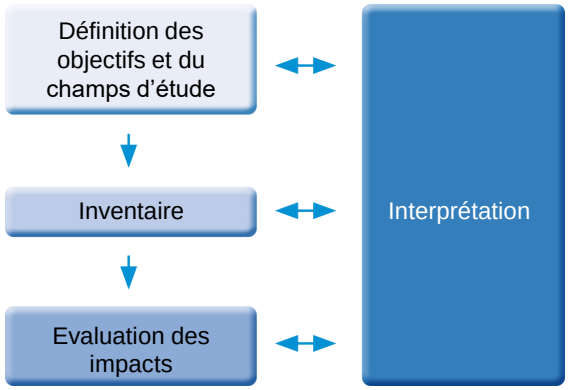
Niveau I	Climate change, Ozone depletion, Particulate matter / Respiratory Inorganics
Niveau II	Ionising radiation, human health, Photochemical ozone formation, Acidification, Eutrophication, terrestrial, Eutrophication, aquatic, Land use, Resource depletion, minerai, fossil and renewable
Niveau II/III	Human toxycity, cancer effects, Human toxicity, non-cancer effects, Ecotoxicity, freshwater
Niveau III	Resource depletion, water
Niveau Interim	Ionising radiation, ecosystems
Niveau Pas de méthode	Ecotoxicity, terrestrial and marine

Indicateurs de management et d’évaluation

Capte les transferts de pollution entre polluants

3. INTÉGRÉE ET NORMALISÉE

Les quatre étapes d’une Analyse du Cycle de vie



ISO

L’analise du cycle de vie (ACV)

> L’Analyse du Cycle de Vie (ACV) confiée à la Direction R&D d’EDF évalue **les impacts potentiels du système étudié (un kWh nucléaire EDF) sur l’environnement.**

> Elle repose sur **l’inventaire des flux de matière et d’énergie** pour les différentes phases du cycle de vie du produit, **de l’extraction des matières premières jusqu’à la gestion des déchets.**

> La réalisation d’un bilan matière et énergie complet permet d’analyser l’ensemble d’un cycle de vie, du **« berceau à la tombe ».** Grâce au calcul d’indicateurs dédiés, son approche multicritère permet d’évaluer un ensemble d’enjeux environnementaux.

> L’étude a strictement respecté les normes **ISO 14040 et ISO 14044**. Elle a fait l’objet d’une **revue critique par un panel d’experts indépendants.**





Objectif

> L’ Analyse du Cycle de Vie du kWh nucléaire **EDF SA en France** porte **sur le parc actuel**.

> Elle est menée avec **les indicateurs ILCD (International Life Cycle Data - Joint Research Center).** Elle met l’accent sur l’indicateur changement climatique.

> L’étude s’inscrit dans un objectif de management environnemental. Elle vise une **meilleure compréhension des contributions de chaque étape et process**. Elle doit permettre d’identifier **les meilleures actions d’amélioration environnementale** à initier et réaliser sur la chaîne de valeur.

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 « moxées »),
- 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.

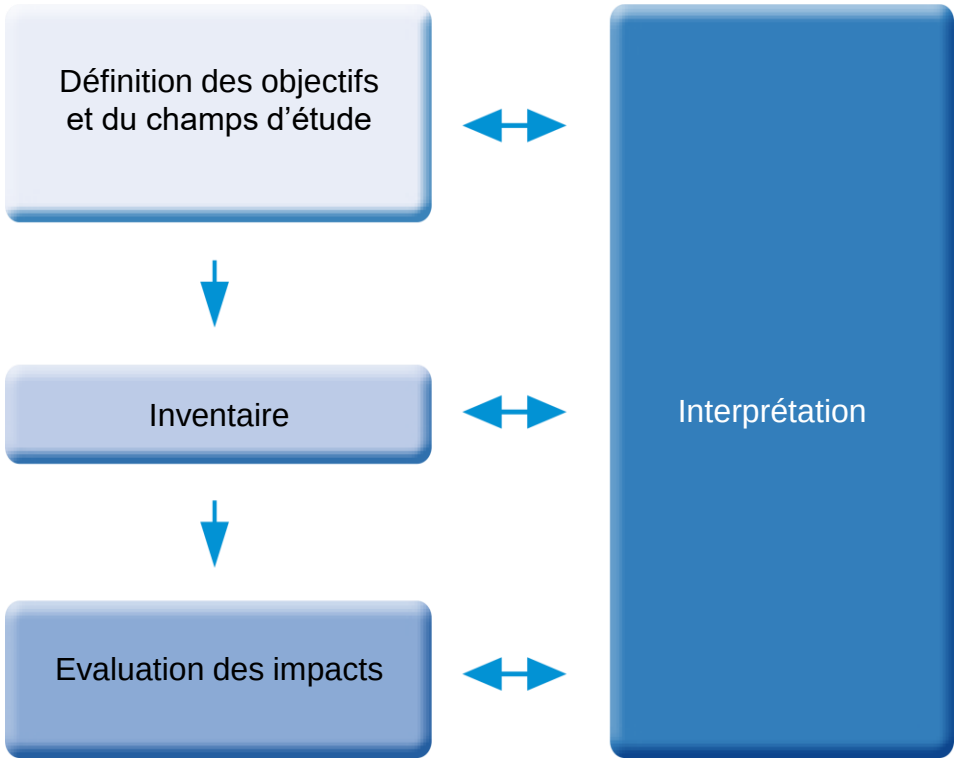




La méthode

La méthode ACV impose le respect de 4 phases successives :

Les quatre étapes d'une Analyse du Cycle de vie



(Source : ISO 14040-44)

Résultats analyse du cycle de vie
« Produire un kWh à partir du parc nucléaire français EDF »

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

Les autres étapes sont décrites par des **données bibliographiques** (inventaires ACV *Ecoinvent : base de données internationale*, si besoin revues et corrigées par les experts EDF.)

L'inventaire ACV obtenu a été interprété avec les indicateurs ILCD considérés comme les plus robustes par le JRC (niveaux I et II).

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

L'étude a fait l'objet d'**une revue critique** par un panel d'experts indépendants.

La durée de vie retenue est de **40 ans.**

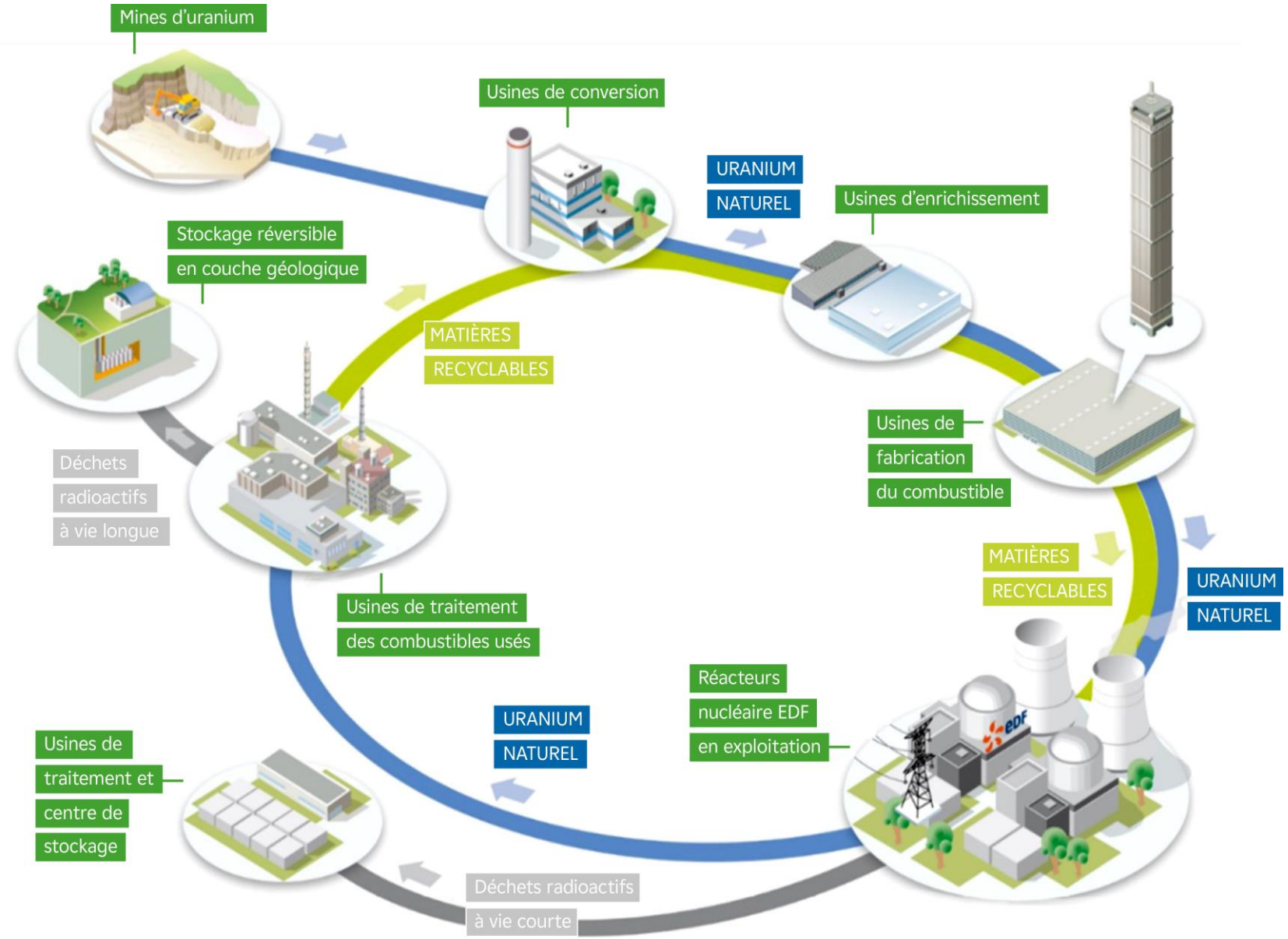
L'étude couvre **l'ensemble des étapes du cycle de vie du kWh nucléaire EDF SA :**

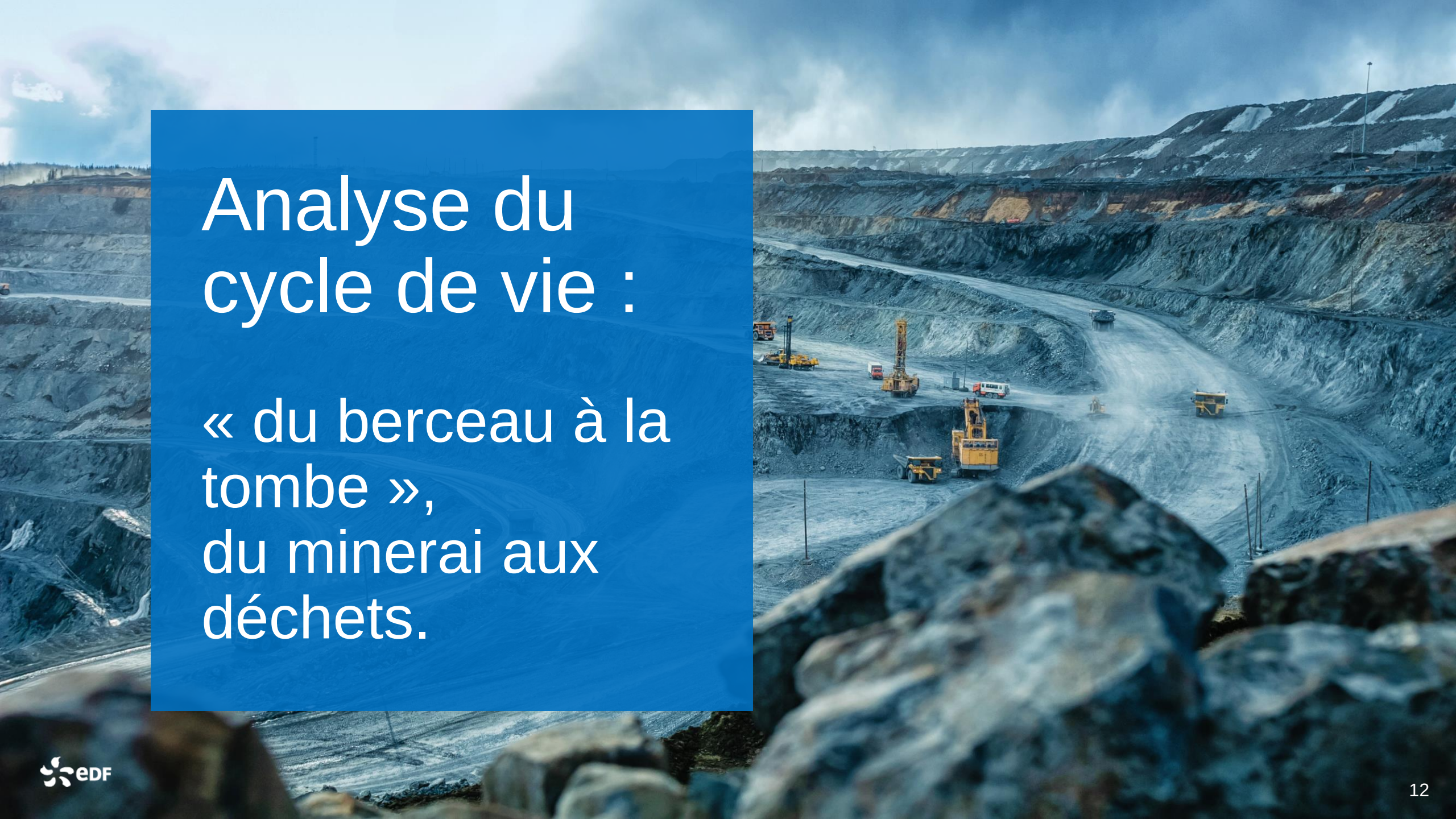
- l'extraction du minerai d'uranium et son traitement, la conversion, l'enrichissement, la fabrication du combustible,
- la production d'électricité (comprenant les étapes de construction, d'exploitation et de déconstruction des centrales nucléaires), le traitement du combustible usé,
- le stockage de tous les déchets radioactifs TFA, FA-MA et HA/MA-VL.

La méthode



Le cycle du combustible





Analyse du cycle de vie :

« du berceau à la tombe »,
du minerai aux déchets.

Les 3 principales méthodes d'obtention de l'U3O8

Mines souterraines



Cigar Lake (Canada), Priargunsky (Russie,)…

Mines à ciel ouvert



Rössing & Husab (Namibie), Somaïr (Niger),…

Mines In Situ Leaching (ISL ou ISR)



Kazakhstan, Russie, Ouzbékistan, Etats-Unis,…

Coût d'exploitation très faible et impact environnemental restreint



Les étapes finales du traitement pour l'obtention de concentrés U_3O_8 (octaoxyde de triuranium) sont communes aux différentes méthodes : **purification, concentration, puis calcination**.

36%

mines souterraines + ciel ouvert

57%

mines In Situ Leaching (ISL)

7%

de mines produisant de l'uranium en sous-produit

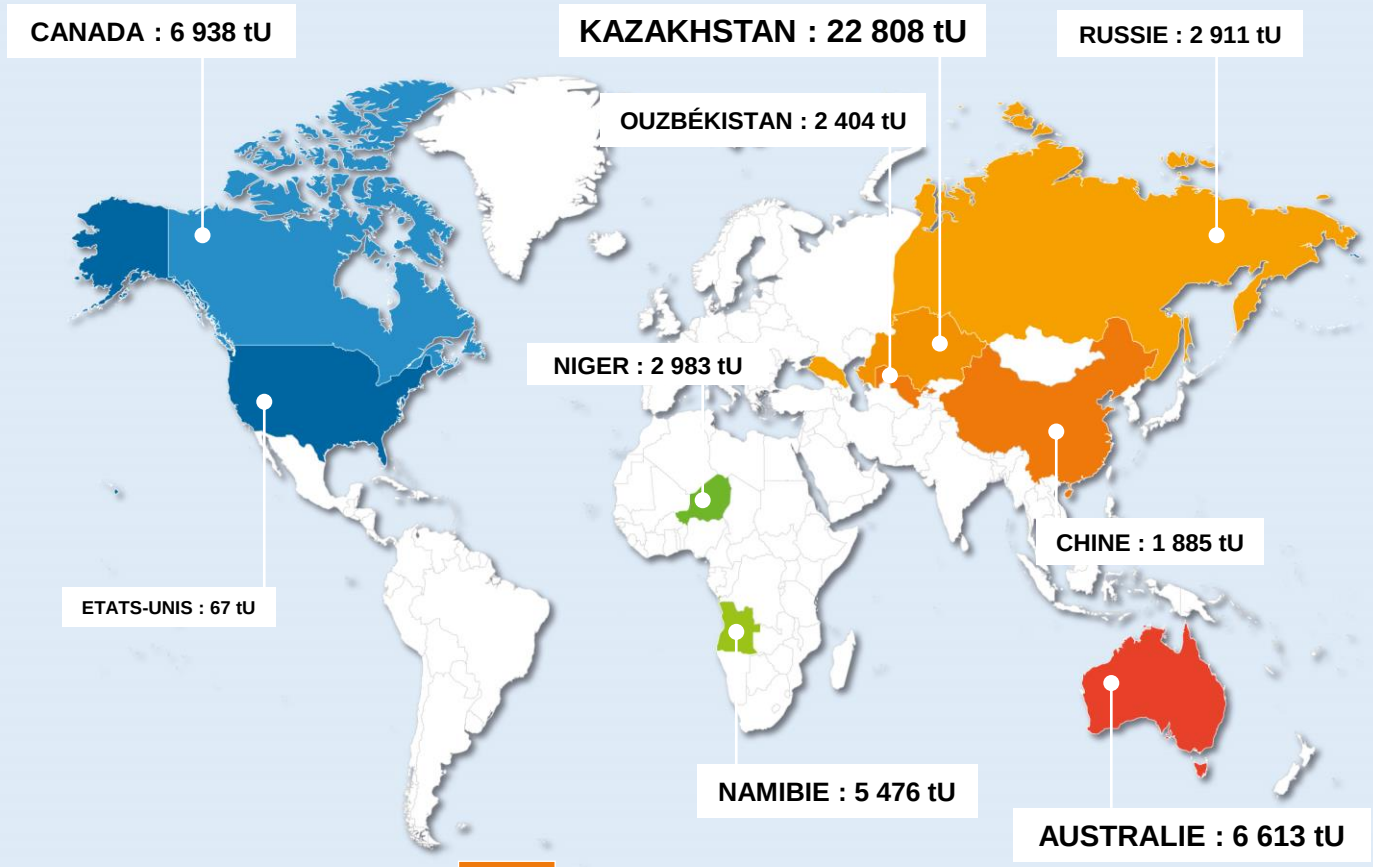
Résultats analyse du cycle de vie
« Produire un kWh à partir du parc nucléaire français EDF »

Les producteurs d'uranium

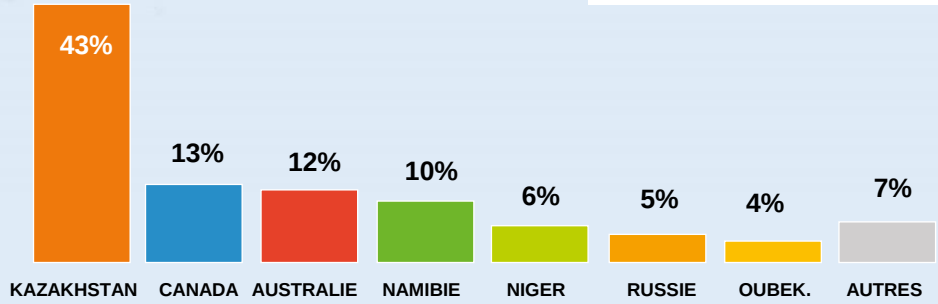
10 producteurs représentent environ 85% de la production mondiale :

- **Kazatomprom** (Kazakhstan) représente à lui seul **23%**
- **Orano** (Kazakhstan, Niger, Canada) **11%**
- **Cameco** (Canada) 9%
- **Uranium One** (Kazakhstan) 9%
- les acteurs chinois : **CNNC** (Namibie) 7% et **CGN** (Kazakhstan, Namibie) 7%
- et **BHP** (Australie) 6%

Répartition par pays de la production mondiale d'uranium en 2019



Les 8 plus grandes mines produisent 50% de l'uranium.



Résultats analyse du cycle de vie
« Produire un kWh à partir du parc nucléaire français EDF »



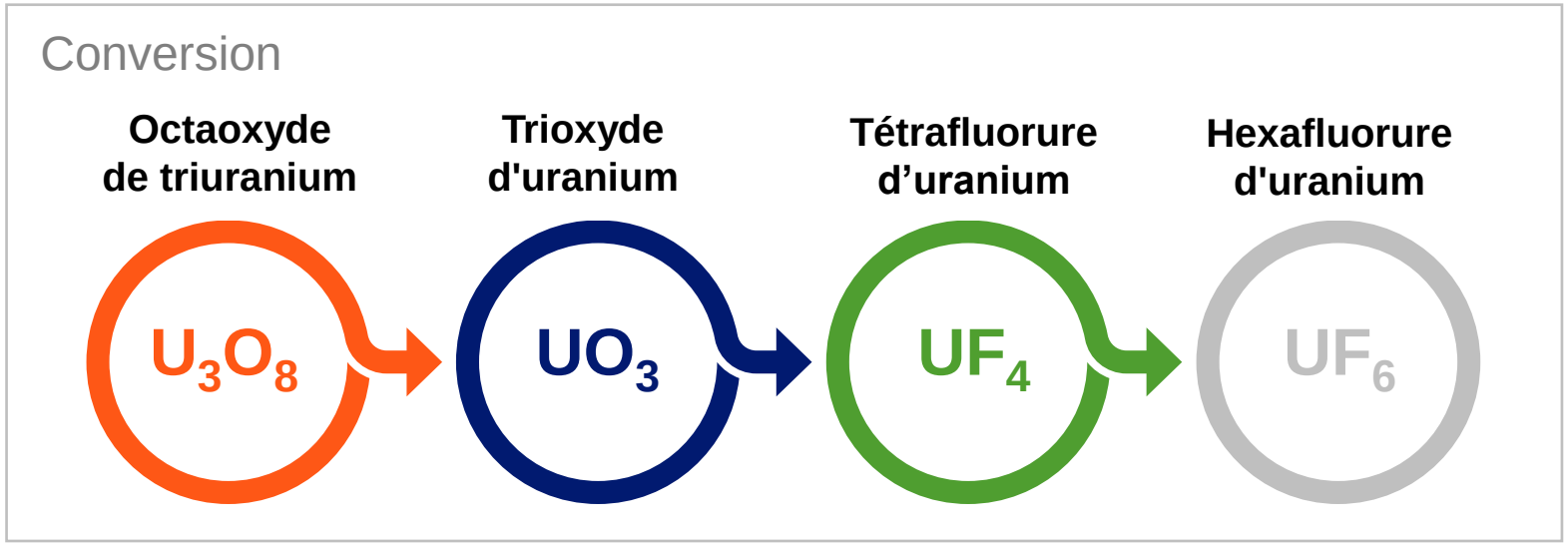
La conversion d’uranium naturel

La **conversion**, également appelée fluoration, permet de :

> **purifier** le concentré d’oxyde d’uranium

> **transformer** depuis une forme solide **(U_3O_8)** en une forme gazeuse (gaz d’hexafluorure d’uranium : **(UF_6) compatible avec le processus d’enrichissement.**

La conversion se fait grâce à des installations de **chimie de pointe**.



Résultats analyse du cycle de vie
« Produire un kWh à partir du parc nucléaire français EDF »

Le marché de la conversion

4 principaux acteurs historiques se partagent le marché « occidental » :

- **Orano,**
- **Cameco,**
- **ConverDyn,**
- **Rosatom (TENEX)**

De nouveaux entrants essayent de développer cette activité :

- **Chine (CNNC)**

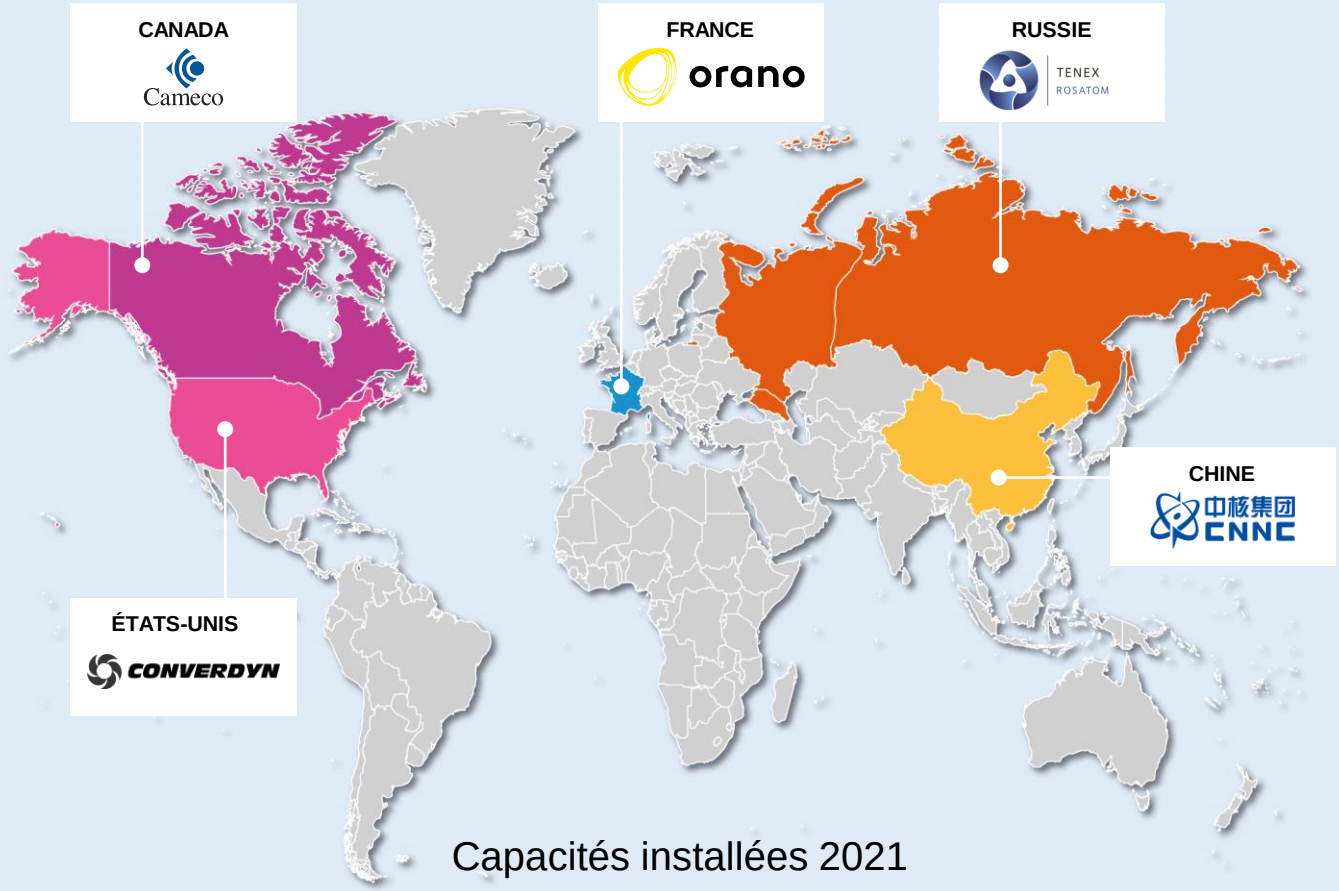
2 acteurs principaux ne produisent pas ou sont toujours en ramp-up, conduisant à des tensions sur le marché :

> l'usine de **ConverDyn** est à **l'arrêt**

> et l'usine Philippe Coste **d'Orano en phase de démarrage** industriel.

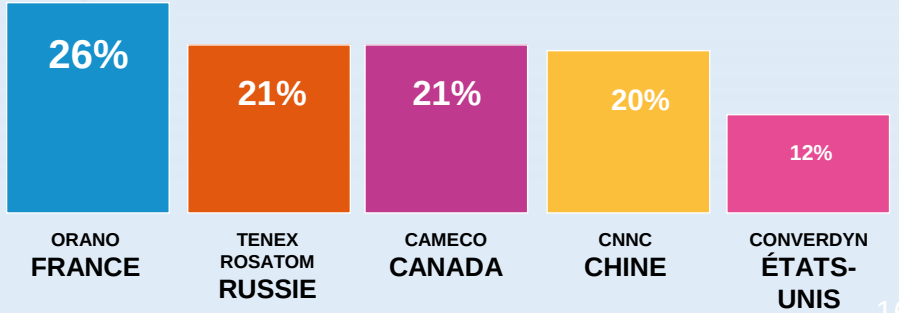
Résultats analyse du cycle de vie
« Produire un kWh à partir du parc nucléaire français EDF »

Répartition par pays du marché de la conversion



Conversion de 1 kgUF6 ≈ 14 à 18 €

Capacités installées 2021

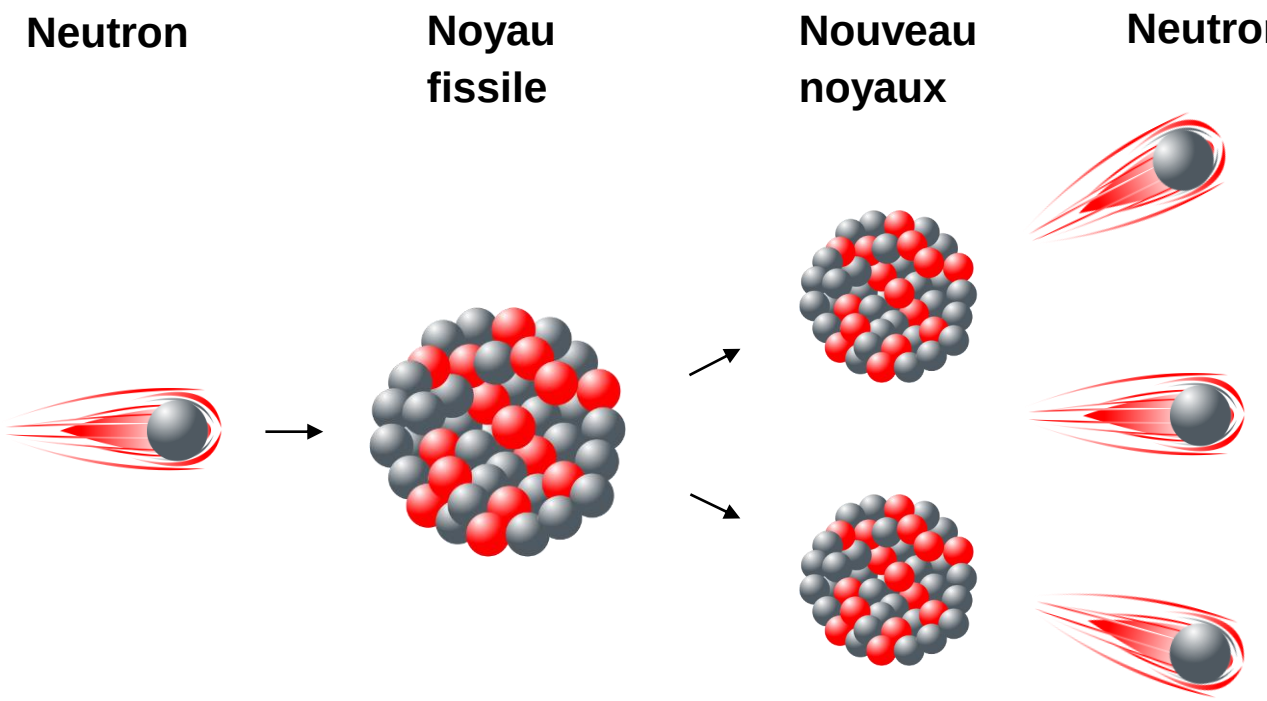


L’enrichissement d’uranium naturel

Pour alimenter un réacteur nucléaire français, il faut avoir de l’uranium contenant entre **3 à 5% d’uranium 235**, car seul cet isotope peut subir la **fission libératrice d’énergie.**

L’uranium naturel a une concentration d’U-235 d’environ **0,7%.**

Fission nucléaire



L’énergie est obtenue par la fission nucléaire, lorsqu’un neutron est projeté sur le noyau d’un atome d’uranium.

En se cassant, ce noyau libère deux ou trois neutrons qui vont à leur tour aller frapper d’autres noyaux.

C’est cette réaction en chaîne qui permet de produire de la chaleur.

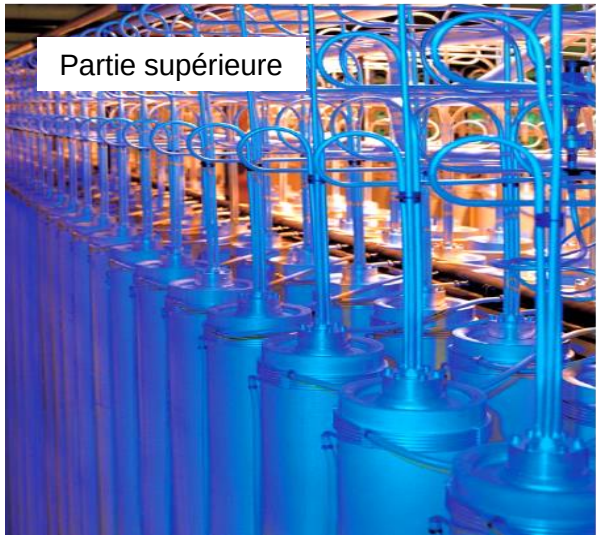
Le processus de l'enrichissement

L'unité utilisée pour décrire l'enrichissement est l'**UTS** (Unité de Travail de Séparation), qui représente **l'énergie nécessaire à la séparation d'uranium en deux fractions** de teneurs isotopiques différentes (U235 et U238)

L'opération consistant à augmenter la proportion d'uranium 235 est appelée «enrichissement», et s'effectue en séparant physiquement l'uranium 235 de l'uranium 238.

La technologie utilisée aujourd'hui est celle de l'ultracentrifugation, qui consiste à utiliser des centrifugeuses. La technologie des centrifugeuses est confidentielle et très sensible.





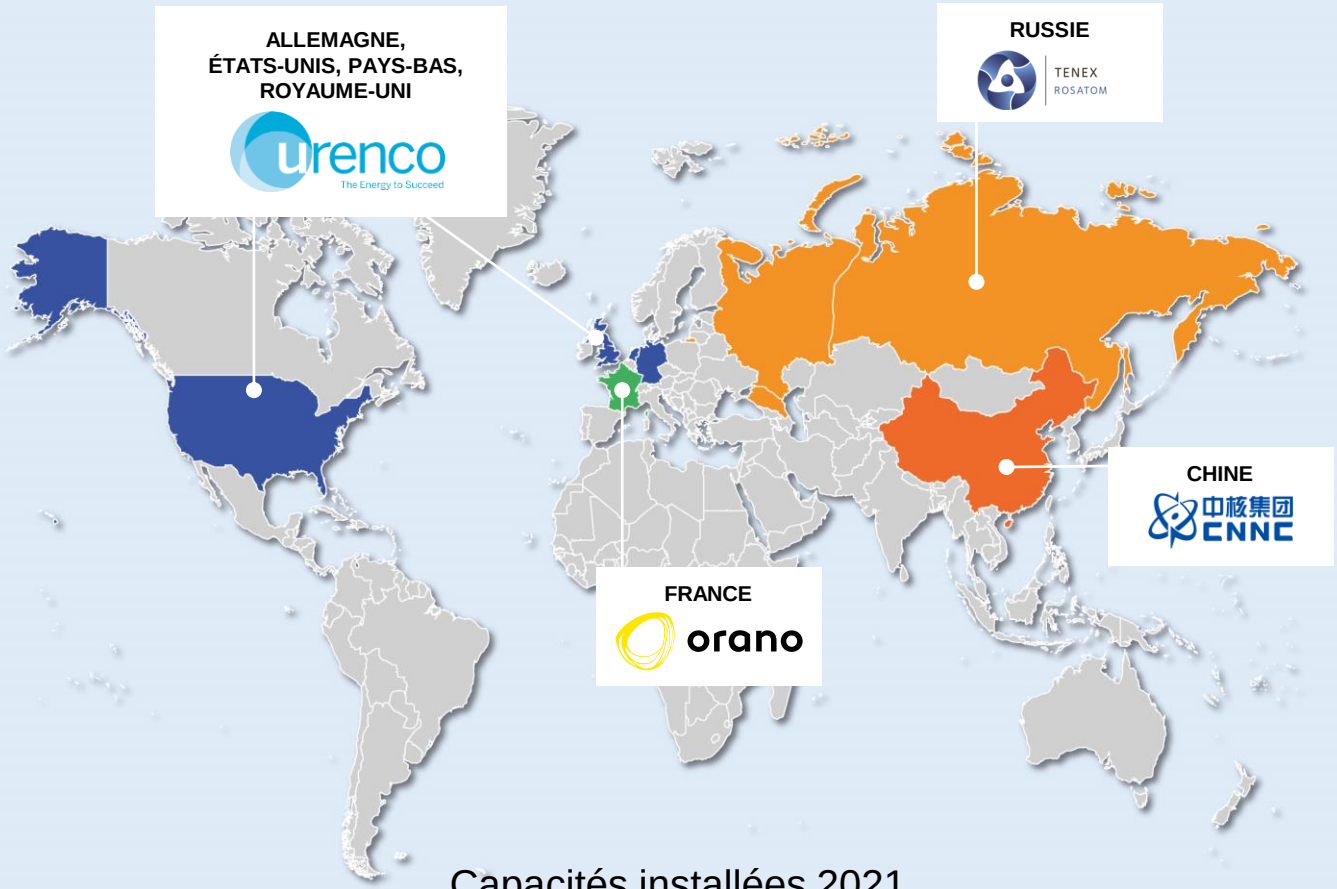


Le marché de l'enrichissement

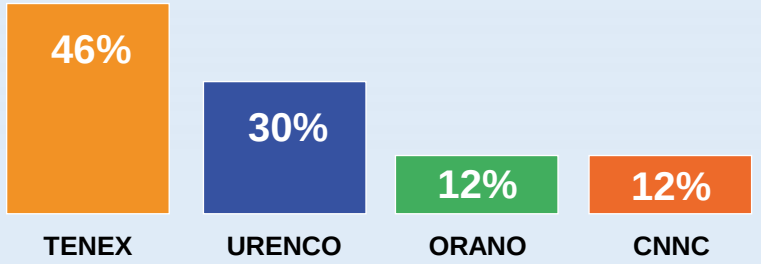
Le marché de l'enrichissement est constitué de **4 acteurs historiques** :

- **Orano** (France),
- **Urenco** (Allemagne, Etats-Unis, Pays-Bas & Royaume-Uni),
- **TENEX** (Russie)
- et plus récemment **CNNC** (Chine).

Répartition par pays du marché de l'enrichissement



Capacités installées 2021



Résultats analyse du cycle de vie
« Produire un kWh à partir du parc nucléaire français EDF »

La production d’électricité

Un Réacteur à Eau Pressurisée permet **d’utiliser une partie de l'énergie thermique libérée lors de la fission nucléaire des atomes U235 et Pu239 pour réchauffer de l’eau.**

Une fois vaporisée, elle actionne un turboalternateur produisant de l'électricité.



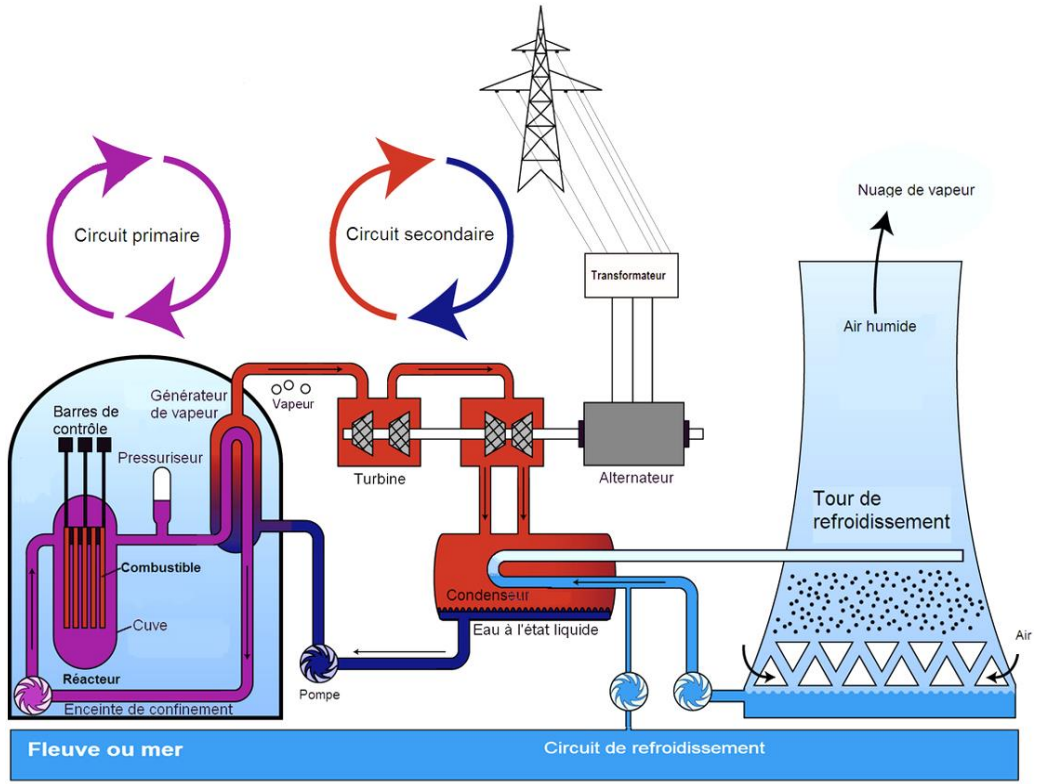
Résultats analyse du cycle de vie
« Produire un kWh à partir du parc nucléaire français EDF »

Les REP (réacteurs à eau pressurisée) comprennent trois circuits indépendants :

1. **le circuit primaire** sous pression **extrait du cœur la chaleur produite par la fission** et la transfère au circuit secondaire par l'intermédiaire d'échangeurs de chaleur (ou **générateurs de vapeur**). Le circuit primaire est complètement fermé.
2. **dans le circuit secondaire** sous plus faible pression, l'eau réchauffée au contact de l'eau primaire dans les générateurs de vapeurs, est vaporisée et **actionne le groupe turbo-alternateur**. Le circuit secondaire est un circuit fermé,
3. **le circuit de refroidissement** permet la condensation de la vapeur du circuit secondaire au contact d'eau froide provenant de fleuves ou de l'océan. **Le refroidissement peut se faire en direct ou via l'utilisation d'aéroréfrigérant.**

REP simplifié

(refroidi en circuit dit « fermé », avec tour aéro-réfrigérante)





Construction et déconstruction des REP

La construction des réacteurs a nécessité du béton, de l'acier de ferraillage, de coffrage…, des câbles, des tuyauteries, de la ventilation, des équipements et câbles électriques, des équipements de contrôle etc.

La déconstruction des centrales nucléaires comprend **trois phases** :

1. **la mise à l'arrêt définitif** (déchargement du combustible, vidange des circuits puis mise à l'arrêt définitif) ; 99.9 % de la radioactivité présente sur le site est alors éliminée,
2. **le démantèlement des bâtiments** jouxtant le bâtiment réacteur.
3. **le démantèlement du bâtiment réacteur** en optimisant la gestion des déchets et en toute sûreté.

Une fois la déconstruction achevée, le site retrouve son niveau de radioactivité naturelle

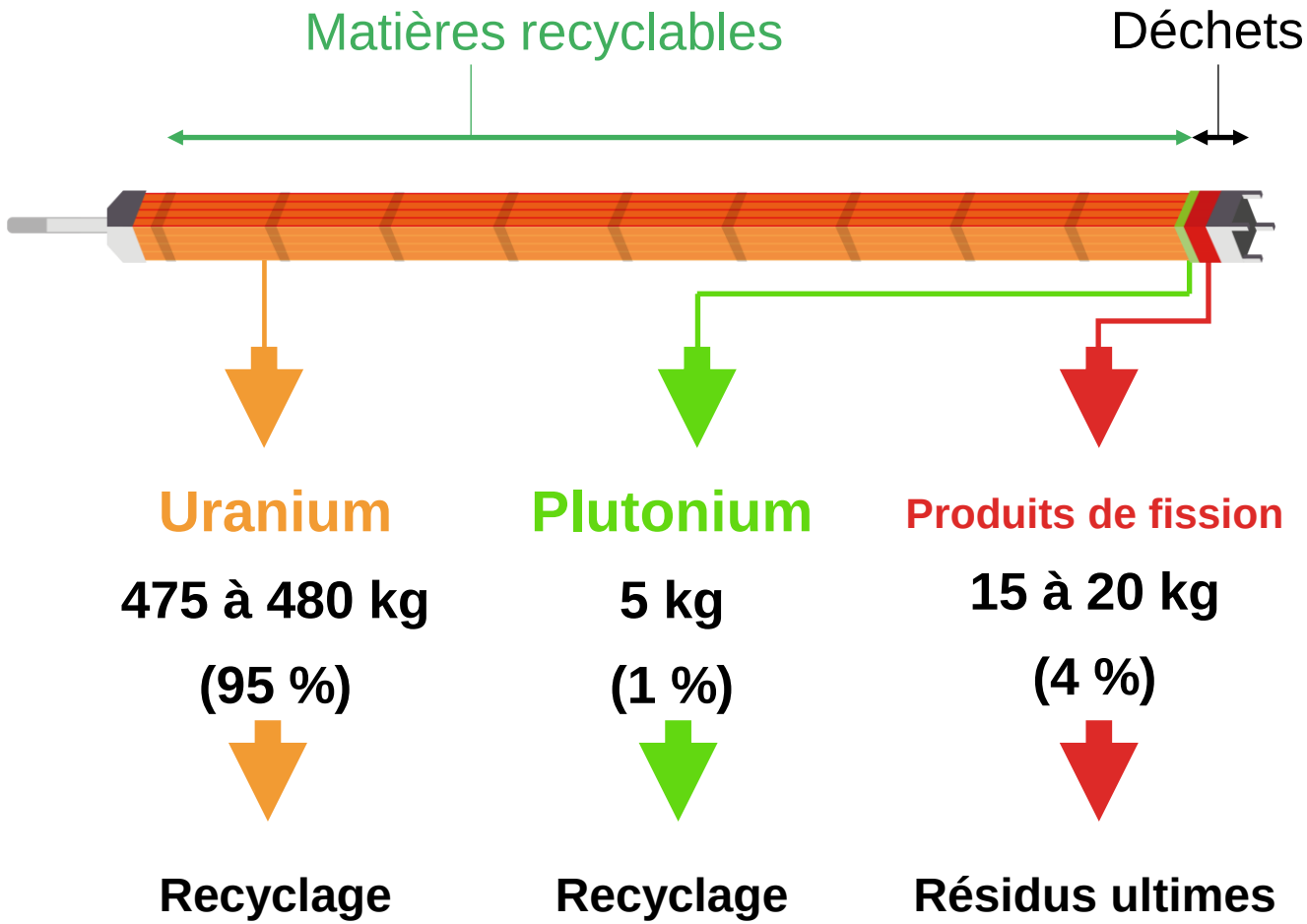
Le traitement du combustible usé

L'opération de traitement du combustible usé consiste à **séparer** :

- **les matières recyclables et valorisables, représentant 96 % des combustibles usés,**
- **les déchets ultimes qui ne représentent que 4 % des combustibles.**

Ces opérations sont réalisées dans les usines Orano de La Hague (France, Cotentin).

Structure du combustible usé après irradiations* (source EDF)

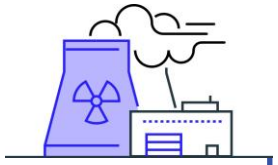


* Pourcentage variable en fonction du taux de combustion

La gestion des déchets radioactifs



Centrale en déconstruction

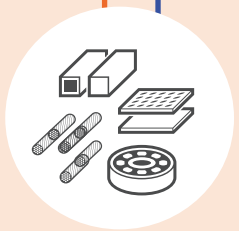


Centrale en fonctionnement

DÉCHETS



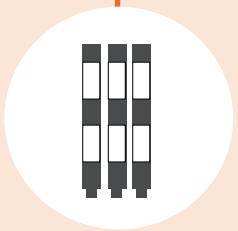
Gravats, ferrailles, tuyaux



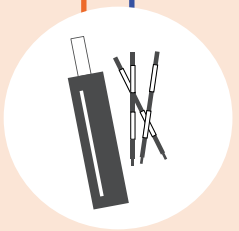
Déchets d'exploitation, de maintenance et de déconstruction



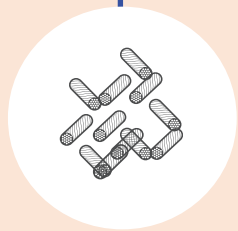
Déchets technologiques et de filtration



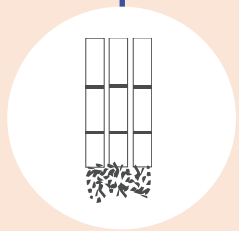
Graphite des centrales 1ere génération UNGG



Pièces et composants métalliques provenant du réacteur



Structures métalliques du combustible usé



Produits de fission du combustible usé

Traitement

FUSION | INCINÉRATION | COMPACTAGE | VITRIFICATION

CONDITIONNEMENT



Fûts métalliques big bag ou casiers



Conteneurs béton, lingots



Fûts / Caissons métalliques plastiques ou béton



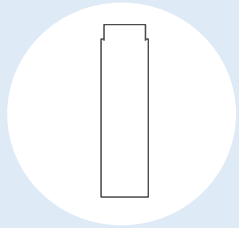
Caissons béton



Conteneurs béton



Conteneurs acier



Conteneurs acier

DESTINATION

Stockage en surface au centre de stockage Andra de Morvilliers (Aube)

Stockage en surface au centre de stockage Andra de Soulaines-Dhuys (Aube)

Stockage à faible profondeur. Projet à l'étude par l'Andra

Entreposage provisoire (CEDA) Mise en service 2019 → Stockage écologique profond (Cigeo). Projet à l'étude par l'Andra

Résultats analyse du cycle de vie
« Produire un kWh à partir du parc nucléaire français EDF »

Le stockage des déchets radioactifs

Un déchet radioactif est une substance radioactive pour laquelle aucune utilisation ultérieure n’est prévue ou envisagée.

Il est dit « ultime » quand il ne peut plus être traité dans les conditions techniques

Est qualifié de **« déchet nucléaire »**, un déchet provenant de l'activité d'une centrale nucléaire. Il se compose essentiellement d'éléments qui émettent des rayonnements radioactifs.



Les déchets radioactifs sont de cinq types :

Type TFA

Les déchets très faiblement actifs, d'une activité inférieure à 100 Bq/g. De demi-vie variable, et de très faible activité, ils sont stockés sur le CIRES, Centre Industriel de Regroupement, d'Entreposage et de Stockage ANDRA à Morvilliers.

Type FA-MA

Les déchets faiblement ou moyennement actifs à vie courte, sont des déchets d'exploitation, de maintenance ou de déconstruction. Ils sont destinés au stockage sur le Centre de Stockage de l'Aube (site ANDRA de Soulaines).

Type FA-VL

Les déchets faiblement actifs à vie longue sont générés par la déconstruction des réacteurs UNGG Ils seront stockés dans un futur centre Andra spécifique à ce type de déchets.

Type MA-VL

Les déchets moyennement actifs à vie longue sont essentiellement générés lors de l'étape de traitement du combustible usé.

Type HA

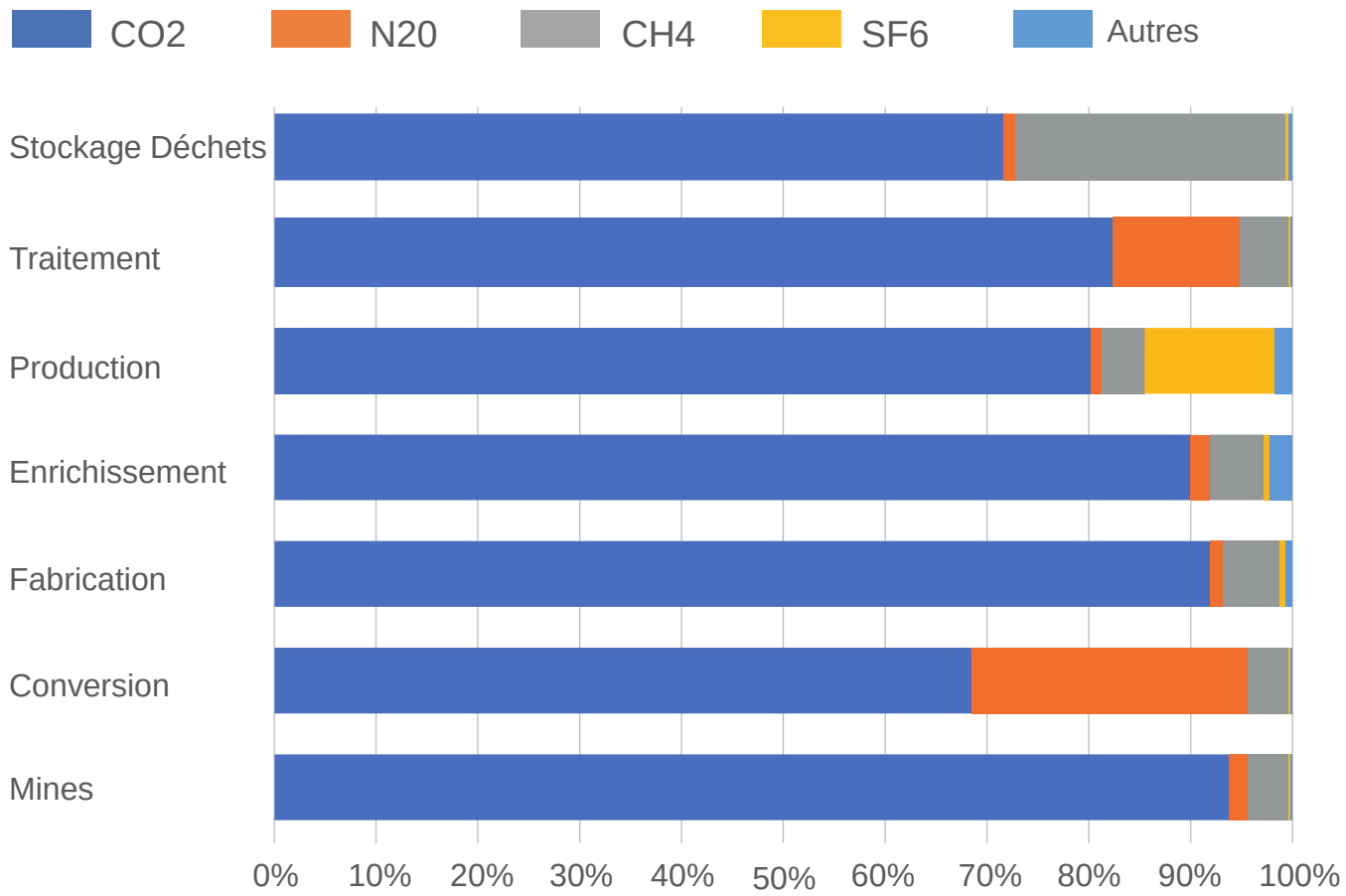
Les déchets hautement radioactifs à vie longue sont produits exclusivement lors de l'étape de traitement du combustible usé. Ce sont les produits de fission, transuraniens et fines en suspension qui sont vitrifiés.

Les résultats de l’étude



Résultats pour l'indicateur changement climatique

Changement climatique

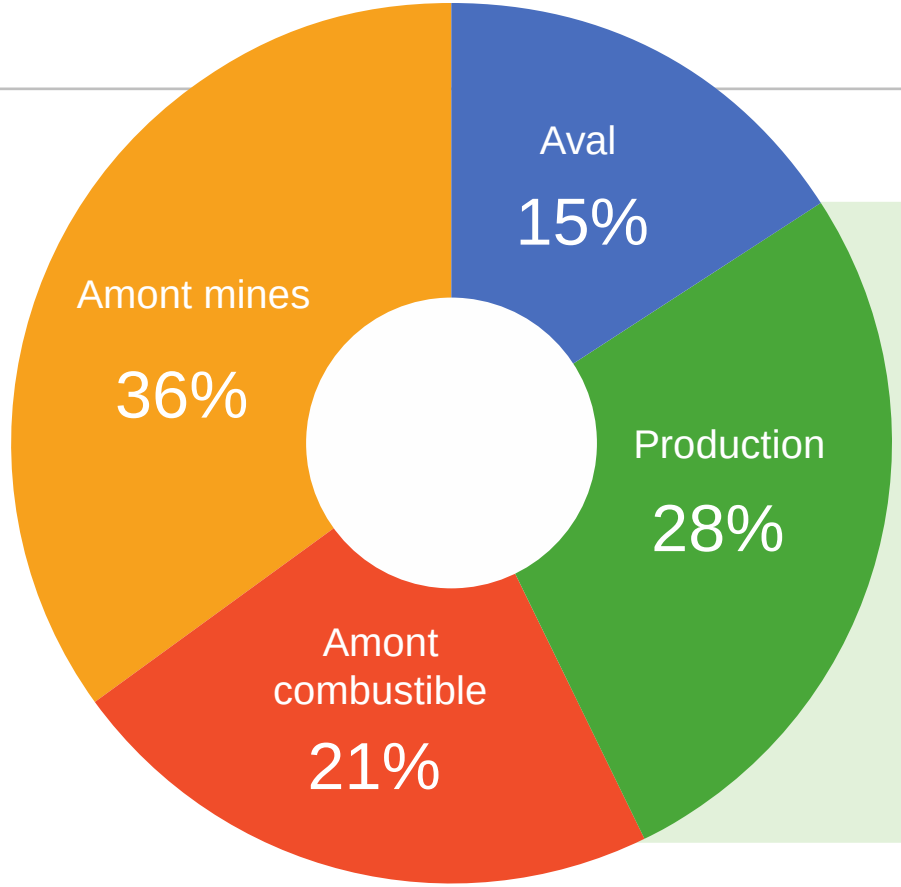


Titre à venir

Etape	G éq 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

La réalisation d'une ACV interne permet :

- d'acculturer les acteurs internes à la méthode
- d'identifier précisément les étapes et flux les plus contributeurs au bilan,
- Et ainsi, disposer d'un référentiel permettant l'analyse et l'amélioration



Production

- Exploitation 8%
- Construction autres 5%
- Construction ciment 6%
- Construction acier 3%
- Construction fer 2%
- Déconstruction 3%

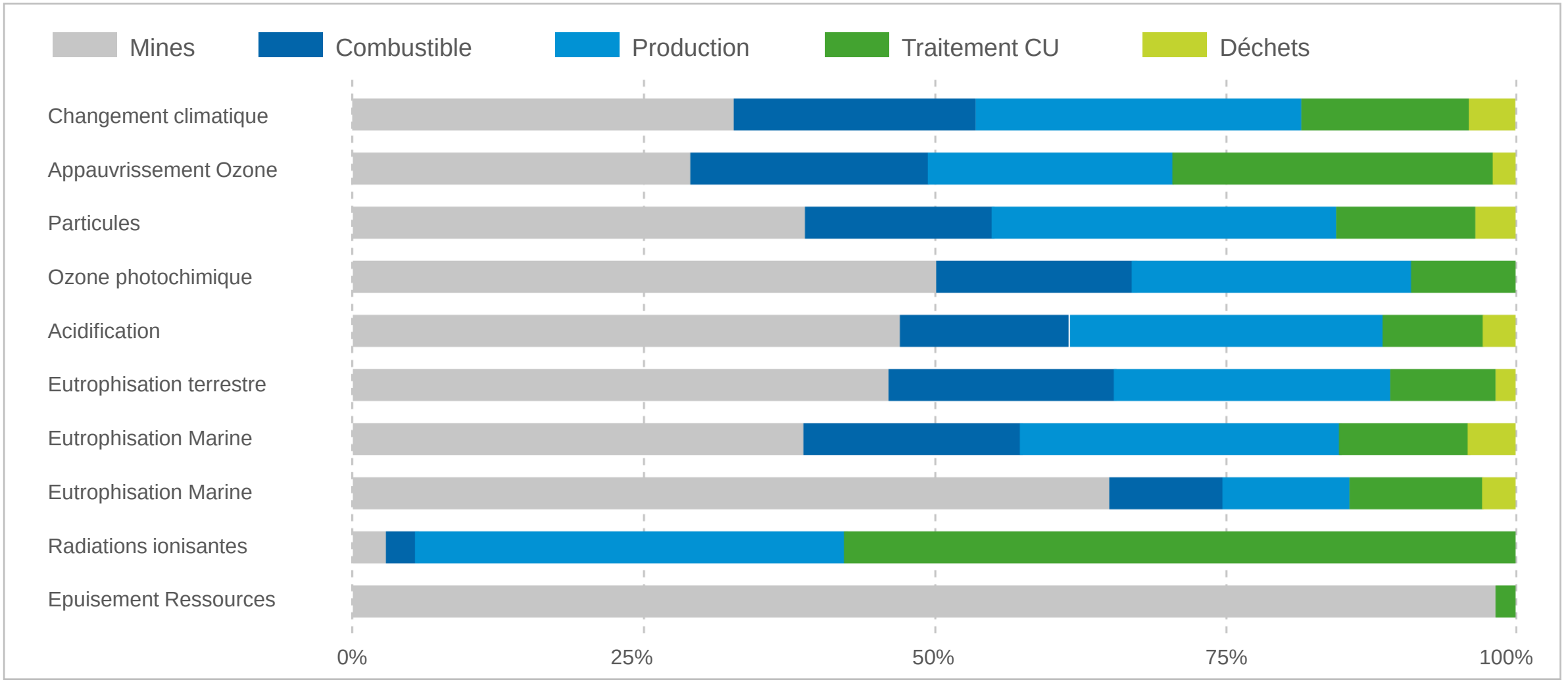
Les autres résultats

Résultats des indicateurs ILCD I & ii et poids relatif de chaque séquence

Niveau	Indicateurs	Résultats	Unité
1	**Changement climatique**	**4 e-3**	Kg éq. CO_2
1	**Appauvrissement couche d'ozone**	4.5 e-10	Kg CFC-11 éq.
1	**Particules**	3.2 e-6	Kg PM2.5 éq.
2	**Radiations ionisantes**	6.8 e-1	Kg U235 éq.
2	**Ozone photochimique**	2.1 e-5	Kg NMVOC éq.
2	**Acidification**	3.4 e-5	mol H+ éq.
2	**Eutrophisation, terrestre**	7.1 e-5	mol N éq.
2	**Eutrophisation, aquatique, eau douce**	1.9 e-7	Kg P éq.
2	**Eutrophication, aquatique marine**	1.5 e-5	Kg N éq.
2	**Epuisement ressources**	4.8 e-6	Kg Sb éq.

Les résultats des indicateurs ILCD I&II pour le kWh produit par le parc nucléaire EDF.

4 g eq CO_2/kWh



Production = construction + exploitation + maintenance

La constitution du Panel

Les experts ont été choisis pour leur complémentarité afin de constituer un panel approprié aux exigences d'ISO 14044 et ISO/TS 14071. Les experts ont travaillé de la façon la plus indépendante possible vis-à-vis d'EDF.





Philippe Osset et Delphine Bauchot sont associés de Solinnen et ont animé le panel. Ils possèdent une grande expertise de la pratique de l'ACV des filières énergétiques, et de l'animation de RC. Philippe Osset représente la France à l'ISO sur les problématiques d'ACV, et a notamment animé le groupe de travail qui a produit ISO/TS 14071





Alain Grandjean et Aurélien Schuller respectivement associé et manager au sein de de Carbone 4, sont des experts de la comptabilité carbone appliquée à des entreprises ou à des produits, dans une logique de cycle de vie, et tout particulièrement dans le secteur de l'énergie.



Christophe Poinssot est Directeur Général Délégué et Directeur Scientifique du BRGM. Il a précédemment travaillé durant 25 ans au CEA où outre ses responsabilités, il a développé une solide expertise dans le domaine du cycle électronucléaire (mines, traitement/recyclage, conditionnement, entreposage et stockage des déchets) le conduisant à être nommé Expert International CEA et Professeur INSTN dans le domaine du cycle. Il a notamment mené des études ACV sur l'empreinte environnementale du nucléaire actuel et futur.

Les membres du panel ne représentent pas leurs organisations.
Ils ont agi en tant qu'experts indépendants.

La conclusion de la revue critique

252 commentaires détaillés sont joints aux conclusions

Un travail important a été réalisé par EDF pour répondre aux commentaires de façon détaillée, et les prendre en compte au sein de son rapport final d'ACV. La pertinence des modifications proposées a été discutée en réunion, et la réalisation effective des modifications vérifiée au vu du rapport final d'ACV.

Le panel note la globale bonne volonté d'EDF qui a apporté dans la majorité des cas des modifications en directe 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.

Le rapport d'ACV d'EDF s'inscrit ainsi bien dans le cadre général des exigences d'ISO 14044 et plus précisément celles concernant les rapports d'ACV tierce partie de son chapitre 5.2**. Les experts du panel de la revue critique précisent que la lecture du rapport d'ACV demande une expertise que n'aura pas forcément une audience peu aguerrie concernant la filière électronucléaire.**

Perspectives

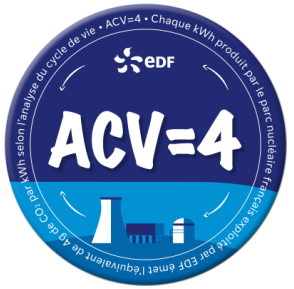
- Impliquer les acteurs amont et aval, y compris les sous-traitants, pour renforcer les résultats et leur analyse
- Renforcer la prise en compte des thématiques environnementales, avec les derniers indicateurs disponibles (eau, occupation des sols)
- Proposer des évolutions pour les indicateurs spécifiques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





Principales conclusions

Un kWh nucléaire EDF qui avec des émissions de 4 grammes équivalent CO_2 confirme son caractère bas carbone



L'amont domine la majorité des indicateurs

Notamment, 57 % de l'indicateur Changement Climatique, avec 36 % pour la mine (diesels, électricité).

Etape production

Construction :
16 % de l'indicateur CC (ciment, acier, fer à béton)

Exploitation :
SF6 4 % (2 178 kg/an),
gazole 2 % (8800 m^3/an)

Déconstruction et maintenance négligeables (3 et 1 %)

Les autres indicateurs

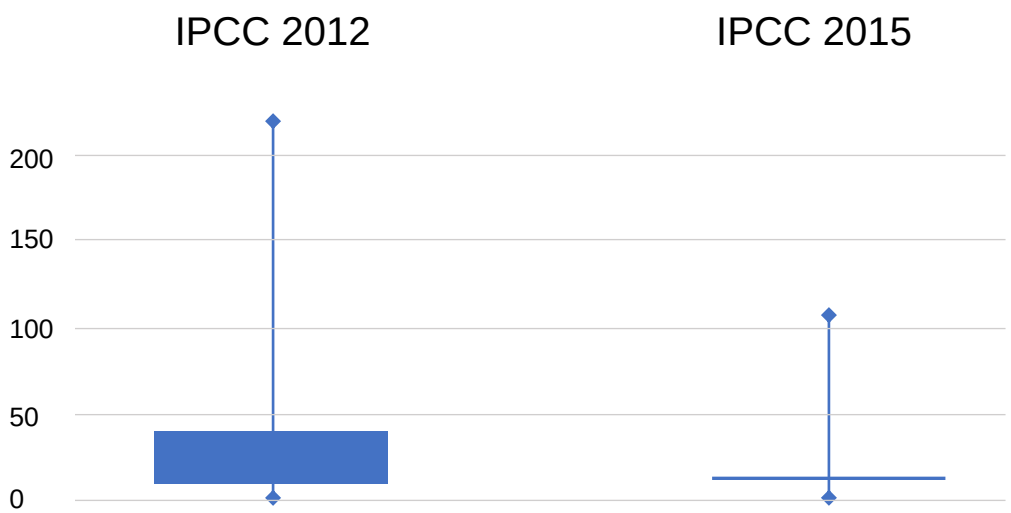
Epuisement des ressources :
uranium 91%, mise en perspective DCN (au rythme de conso annuelle, au moins 118 années de réserve)

Radiations ionisantes :
Traitement 60 %,
exploitation 37 % , via le C14 air ;
mise en perspective DCN/DPN (surveillance radiologique locale)

ACV kWh nucléaire

Des résultats convergents dans la catégorie très bas carbone.

Résultats GIEC
(échelle monde)



12 g eq CO_2/kWh

ACV France

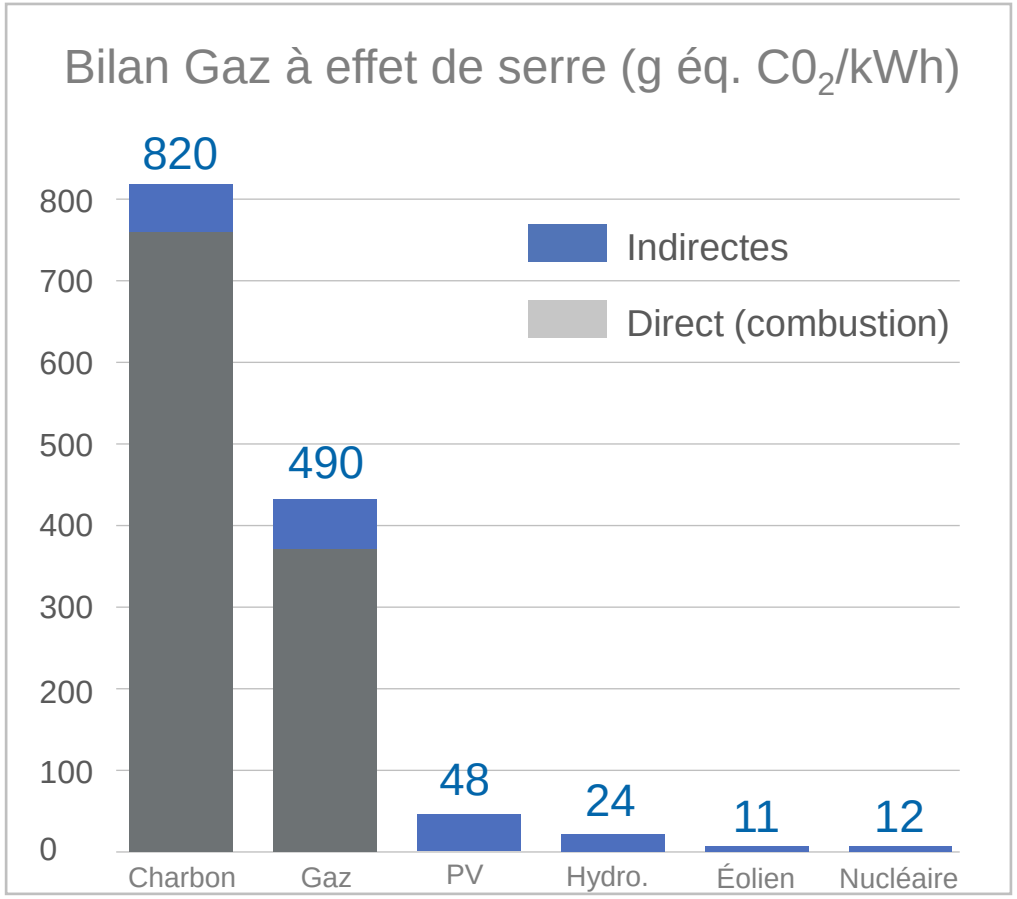
6 g eq CO_2/kWh

Extrait d'une version de la BDD ACV

5 g eq CO_2/kWh

4 g eq CO_2/kWh

Filière de production : Résultats de référence



Source : revue de littérature IPCC, 2015

Résultats analyse du cycle de vie
« Produire un kWh à partir du parc nucléaire français EDF »




eDF
Merci