



Analyse du Cycle de Vie

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



Le kWh nucléaire EDF émet 4 g équivalent CO₂



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 CO₂, conciliant préservation de la planète, bien-être et développement, grâce à l'électricité et à des solutions et services innovants ».



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



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

PRÉSERVATION DES RESSOURCES DE LA PLANÈTE



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

BIEN ÊTRE & SOLIDARITÉ



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

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

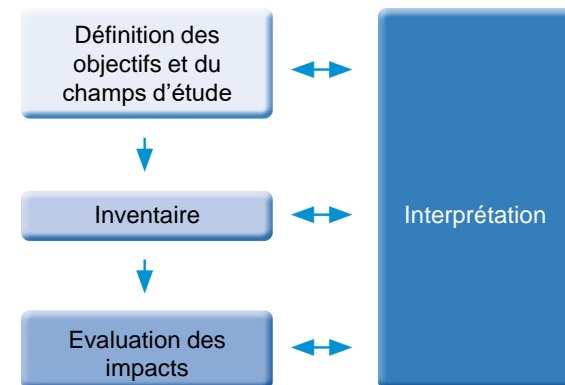
Niveau I	Climate change, Ozone depletion, Particulate matter / Respiratory Inorganics
Niveau II	Ionising radiation, human health, Photochemical ozone formation, Acidification, Eutrophication, terrestrial, Eutrophication, aquatic, Land use, Resource depletion, mineral, fossil and renewable
Niveau II/III	Human toxicity, 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



L'analyse 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.



Résultats analyse du cycle de vie

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

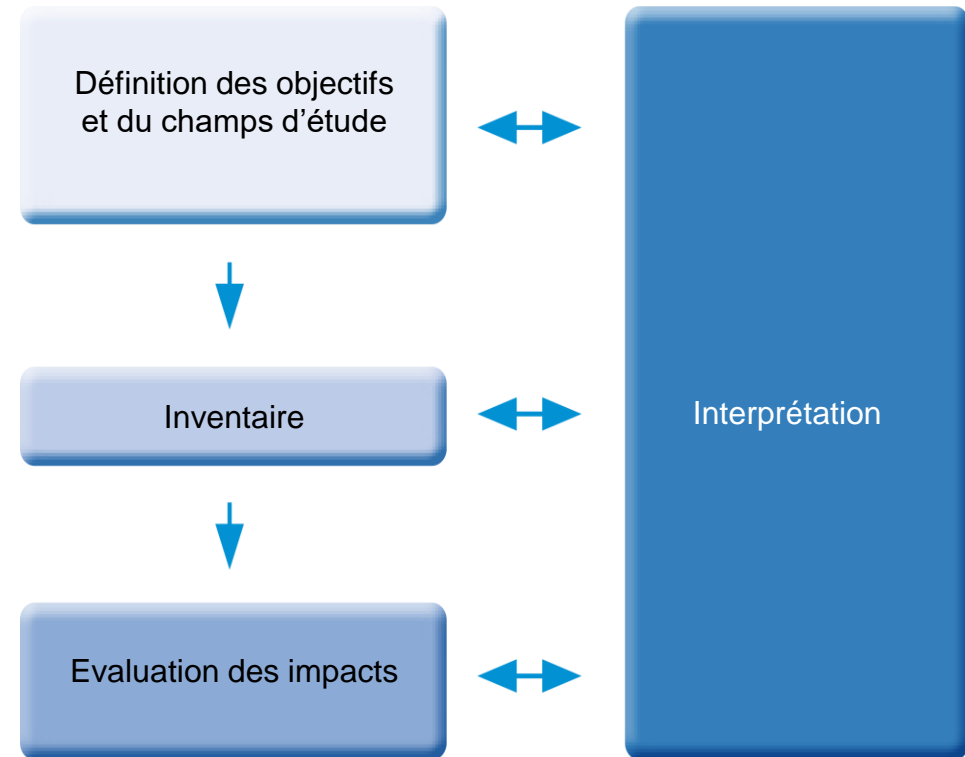




La méthode

La méthode ACV impose le respect de 4 phases successives :

Les quatre étapes d'une Analyse du Cycle de vie



(Source : ISO 14040-44)

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.

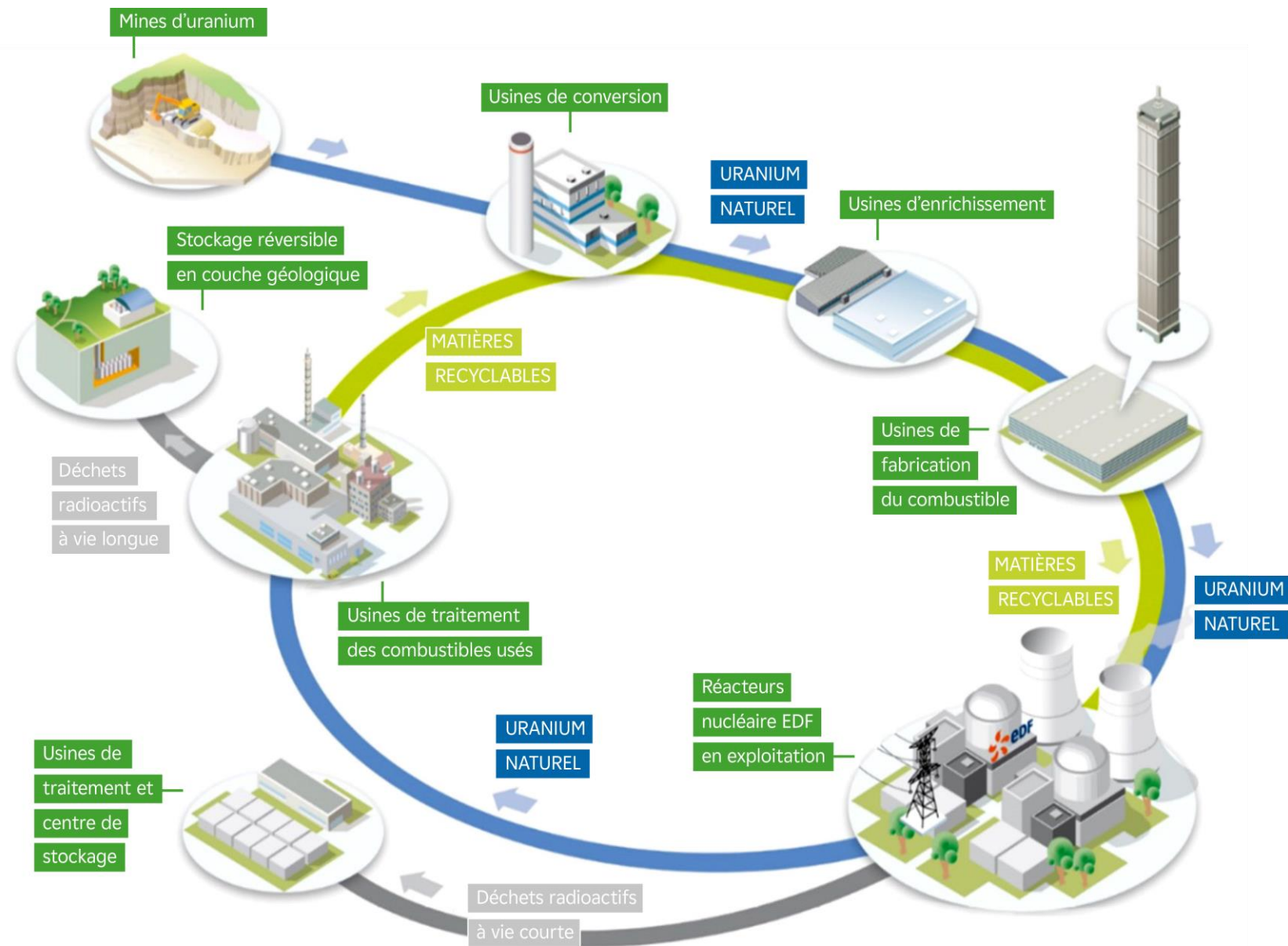
La durée de vie retenue est de **40 ans**.

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 utilisé,
- le stockage de tous les déchets radioactifs TFA, FA-MA et HA/MA-VL.



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



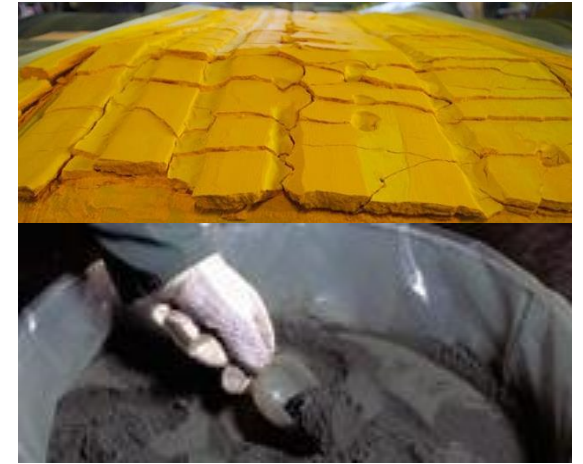
Rössing & Husab (Namibie),
Somaïr (Niger),...

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 U₃O₈ (octaoxyde de triuranium) sont communes aux différentes méthodes : **purification, concentration, puis calcination.**

36%

mines souterraines
+ ciel ouvert

57%

mines In Situ Leaching
(ISL)

7%

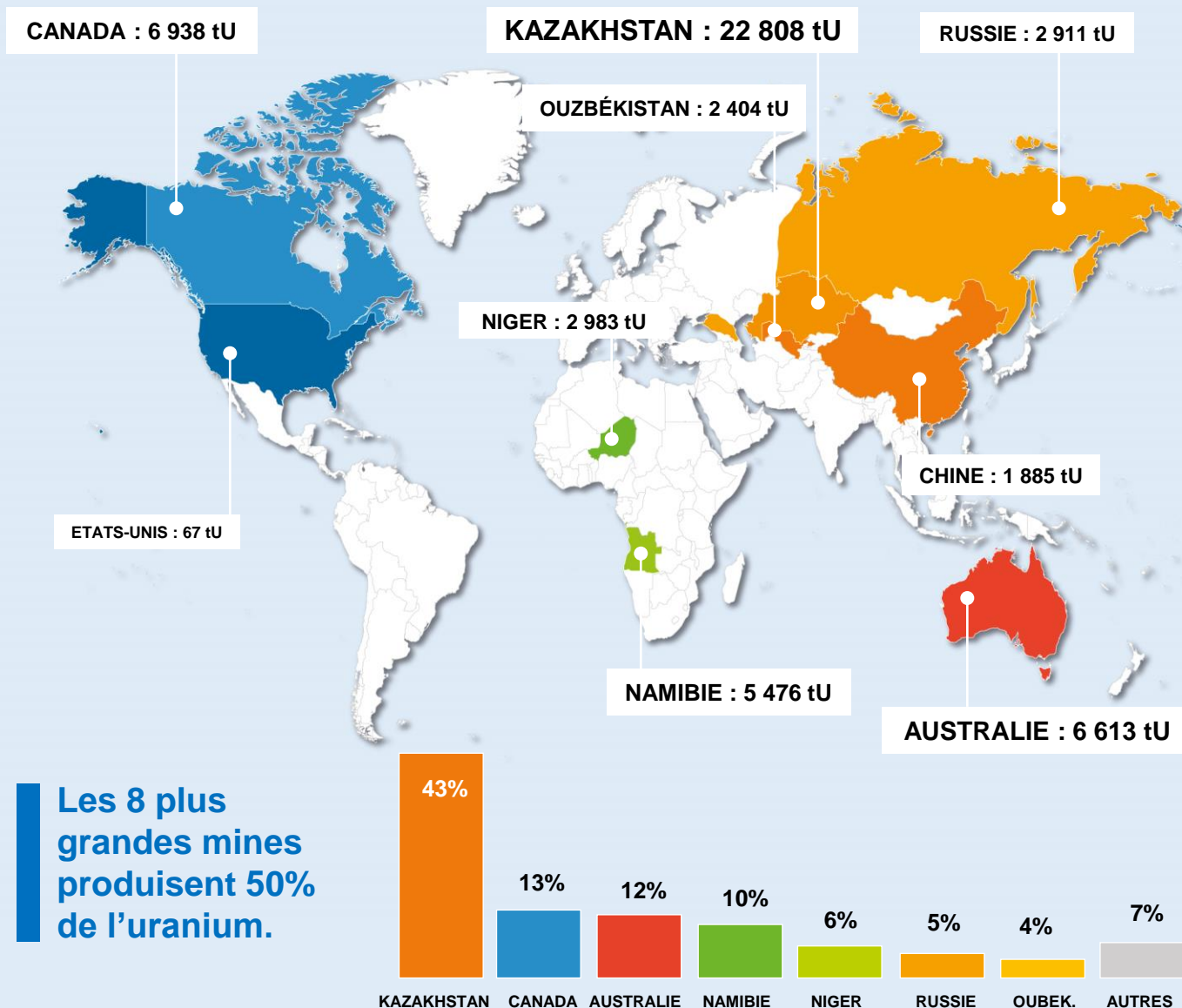
de mines produisant de
l'uranium en sous-produit

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





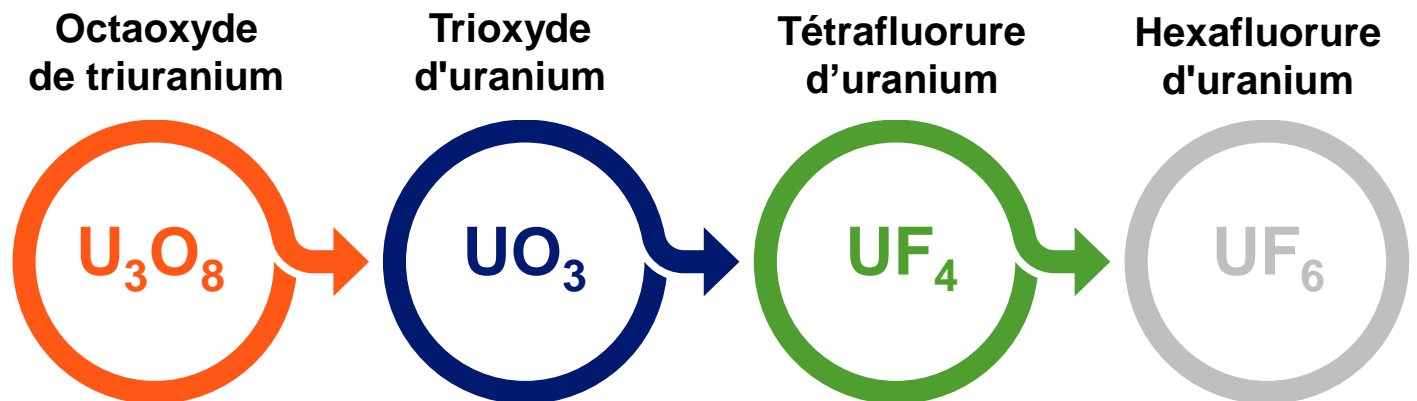
La conversion d'uranium naturel

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**.

Conversion



Le marché de la conversion

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

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

De nouveaux entrants essaient 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 :

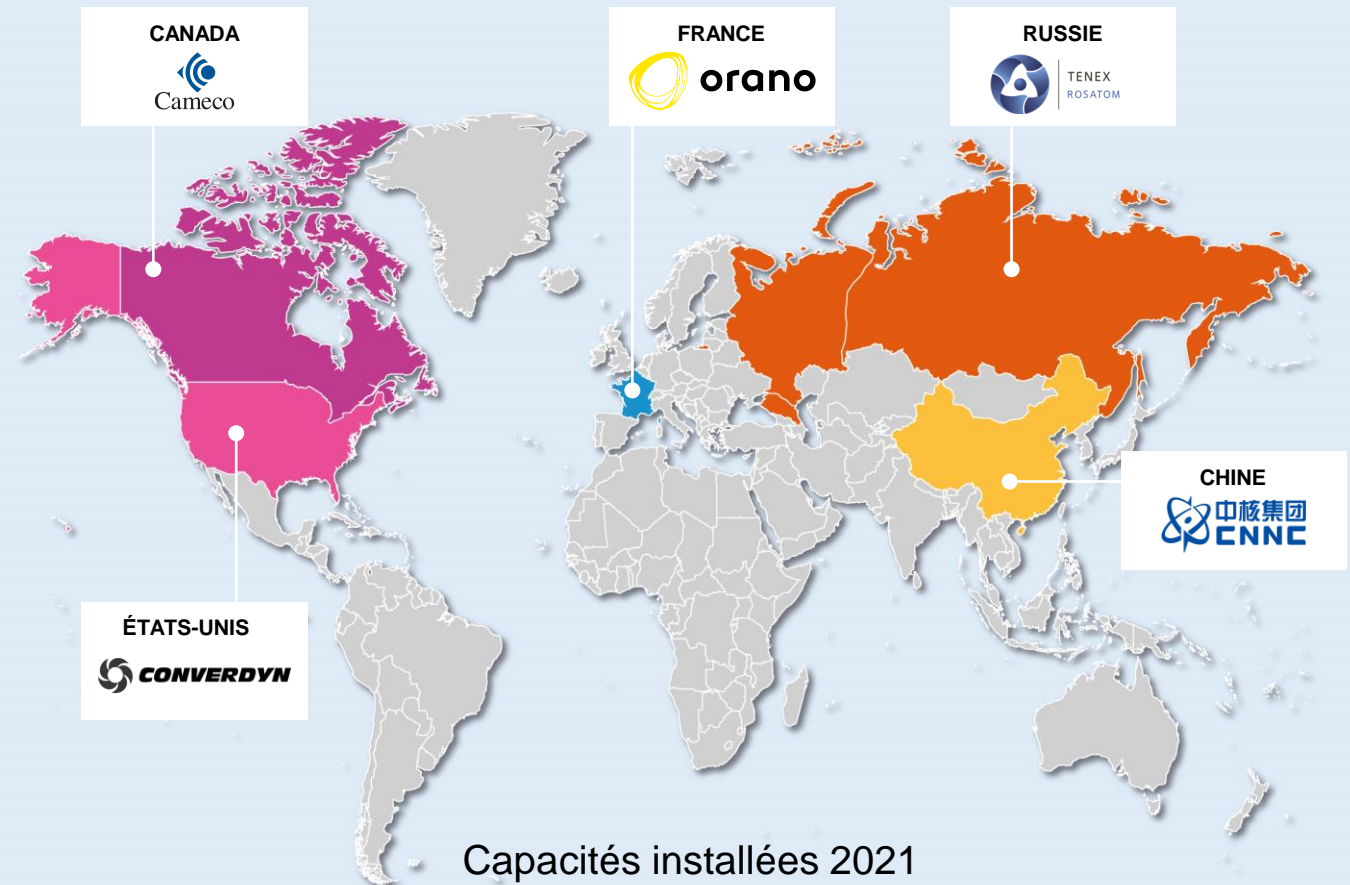
> l'usine de **ConverDyn** est à l'arrêt

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

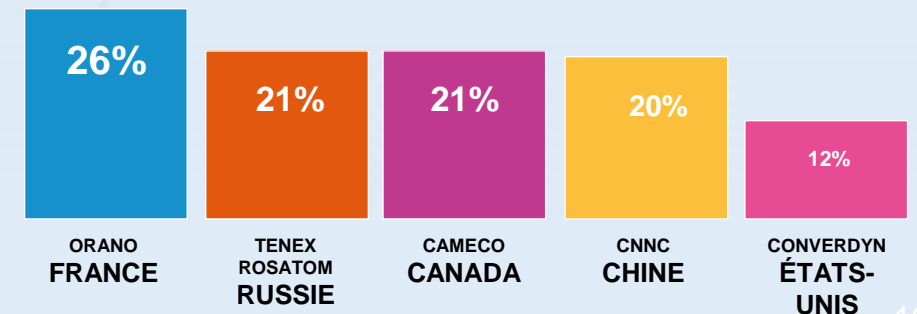


Résultats analyse du cycle de vie
« Produire un kWh à partir du parc nucléaire français EDF »

Répartition par pays du marché de la conversion



Conversion
de 1 kgUF6
≈ 14 à 18 €

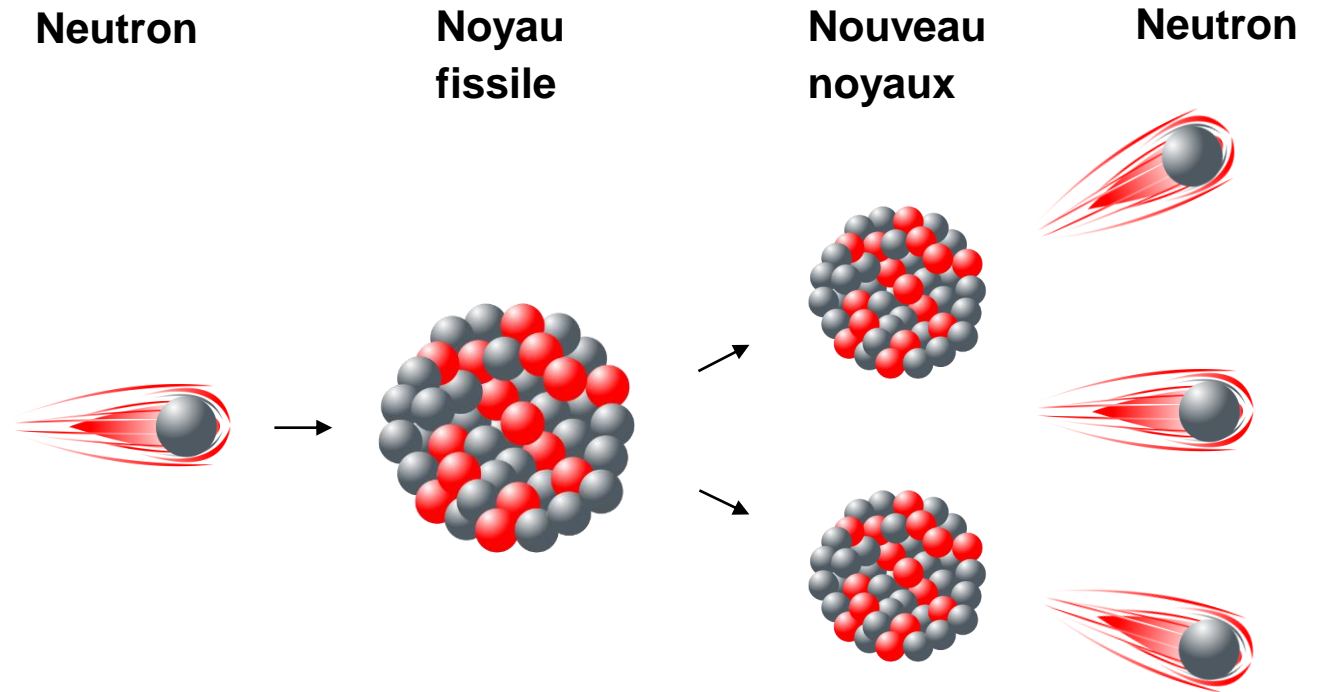


L'enrichissement d'uranium naturel

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.

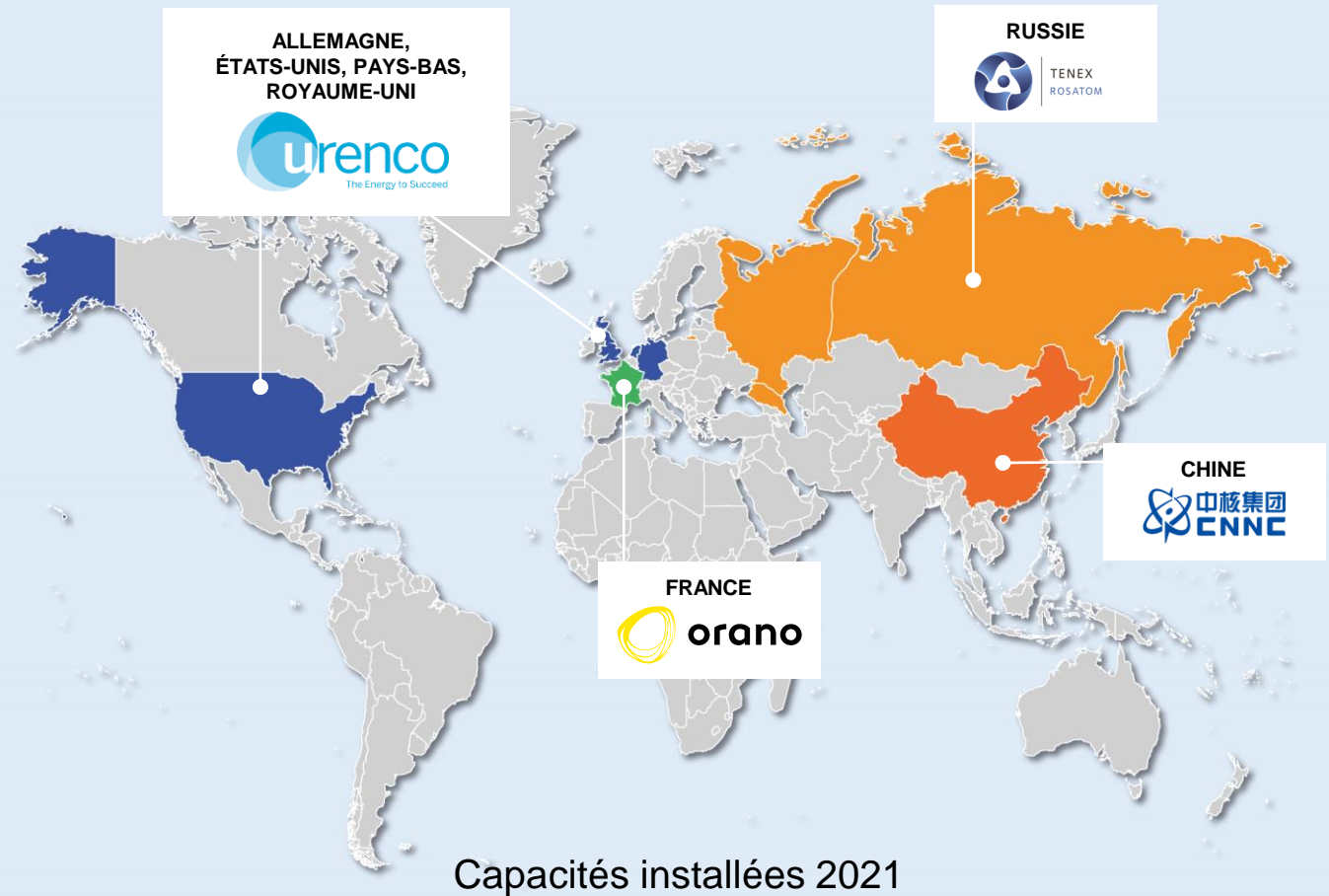


Le marché de l'enrichissement

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

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

Répartition par pays du marché de l'enrichissement



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.

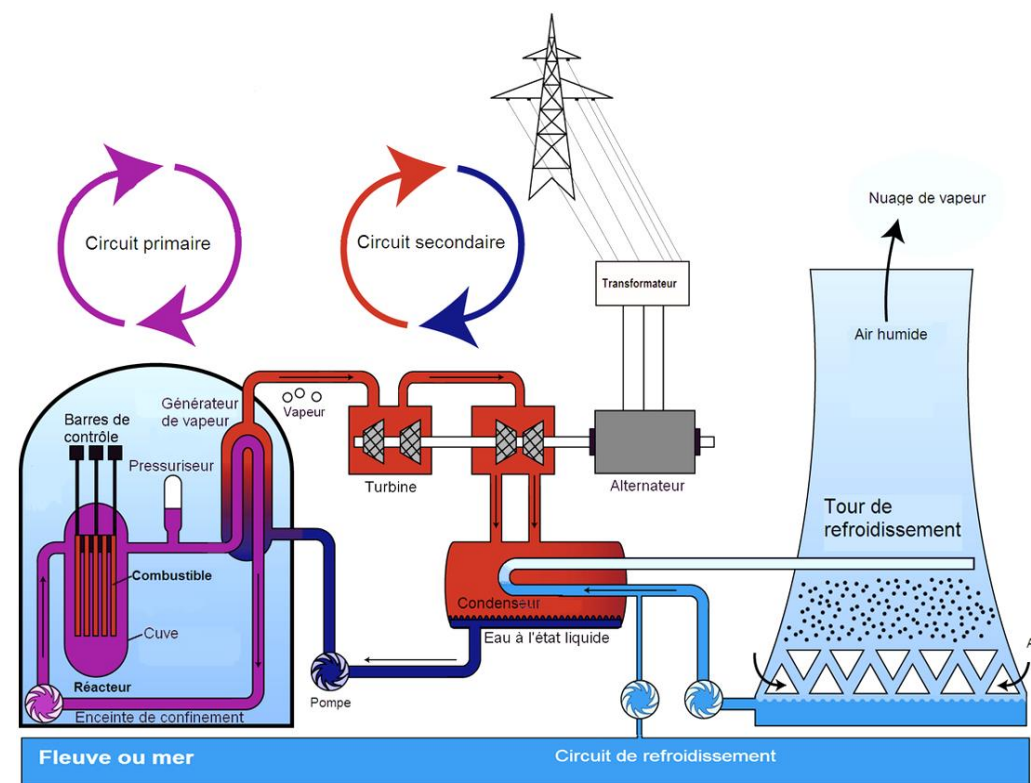


Les REP (réacteurs à eau pressurisée) comprennent trois circuits indépendants :

1. **le circuit primaire** sous pression **extraie 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 ferrailage, 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

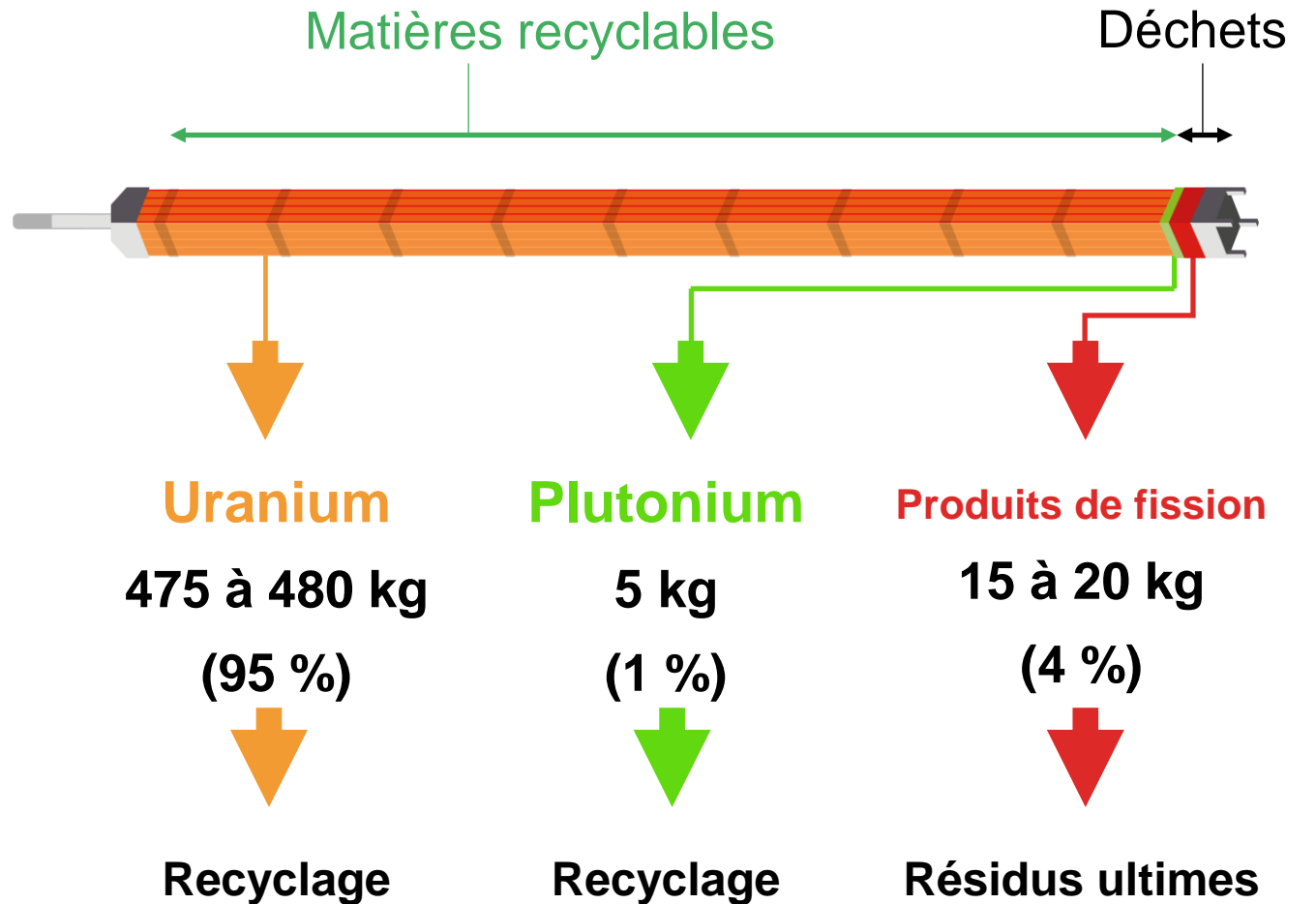
Le traitement du combustible usé

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.**

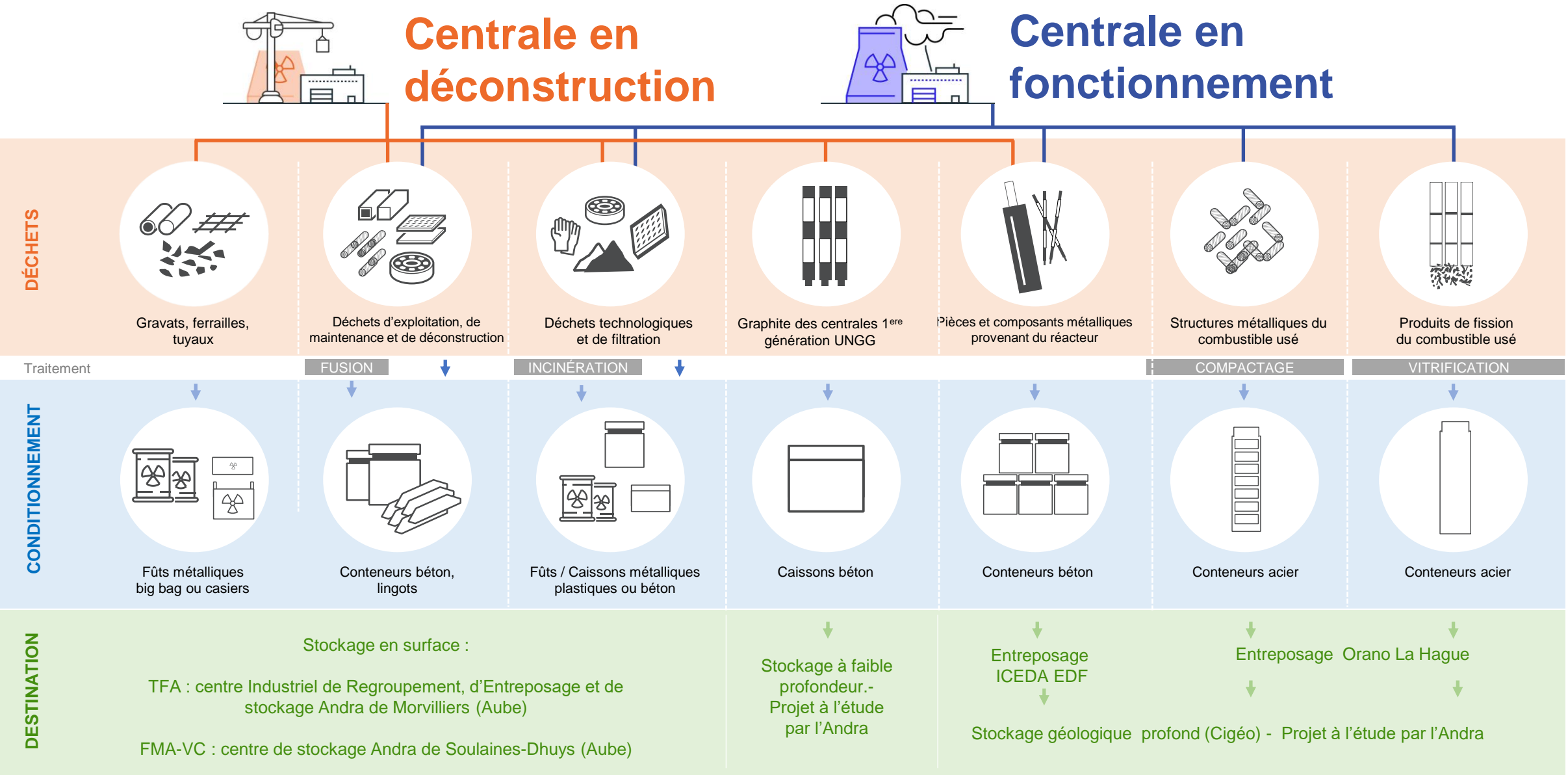
Ces opérations sont réalisées dans les usines Orano de La Hague (France, Cotentin).

Structure du combustible usé après irradiations*
(source EDF)



* Pourcentage variable en fonction du taux de combustion

La gestion des déchets radioactifs



Les 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 et économiques du moment.

L'industrie nucléaire génère des **déchets radioactifs** classés selon leur activité et leur durée de vie. Leur mode de gestion est déterminé en fonction de ces caractéristiques.



Les déchets radioactifs sont de cinq types :

Type TFA

Déchets de très faible activité (activité inférieure à 100 Bq/g), ils sont stockés au Centre Industriel de Regroupement, d'Entreposage et de Stockage Andra à Morvilliers.

Type FMA-VC

Déchets de faible ou moyenne activité à vie courte (activité de quelques centaines de Bq/g à un million de Bq/g, et demi-vie inférieure à 31 ans), ils sont stockés au Centre de Stockage Andra de Soulaines.

Type FA-VL

Déchets de faible activité à vie longue (activité de quelques centaines de Bq/g à un million de Bq/g, et demi-vie supérieure à 31 ans), ils sont générés par la déconstruction des réacteurs UNGG et leur solution de stockage est à l'étude.

Type MA-VL

Déchets de moyenne activité à vie longue (activité de l'ordre d'un million à un milliard de Bq/g, et demi-vie supérieure à 31 ans), ils sont générés d'une part lors du remplacement ou du démantèlement de composants situés au cœur des réacteurs, et d'autre part lors de l'étape de traitement du combustible usé. Ils sont destinés à terme au stockage géologique (projet Cigéo).

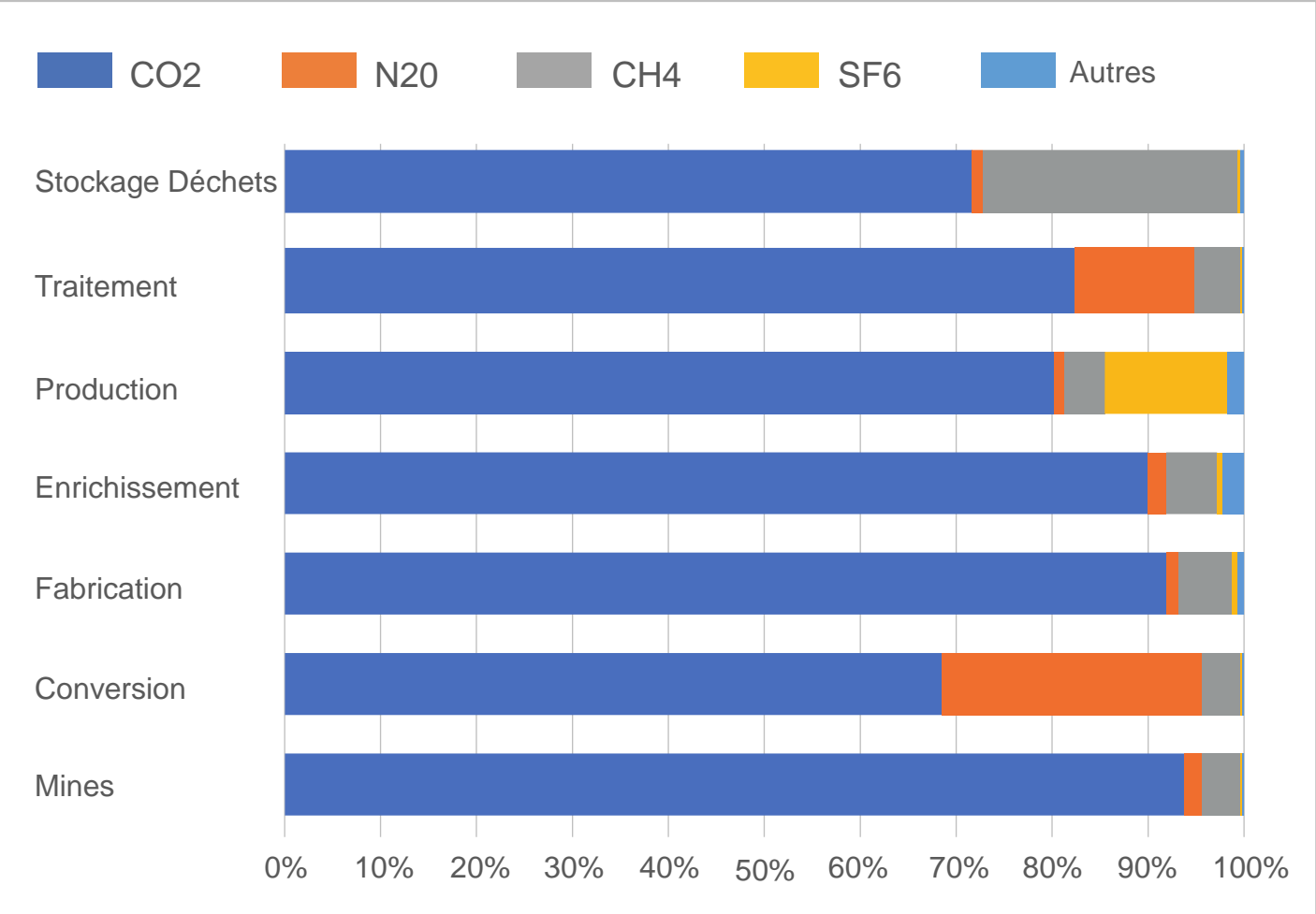
Type HA

Déchets de haute activité (activité de l'ordre de plusieurs milliards de Bq/g), ils sont produits exclusivement lors de l'étape de traitement du combustible usé. Ce sont les produits de fission et transuraniens qui sont vitrifiés. Ils sont destinés à terme au stockage géologique (projet Cigéo).

Les résultats de l'étude

Résultats pour l'indicateur changement climatique

Changement climatique

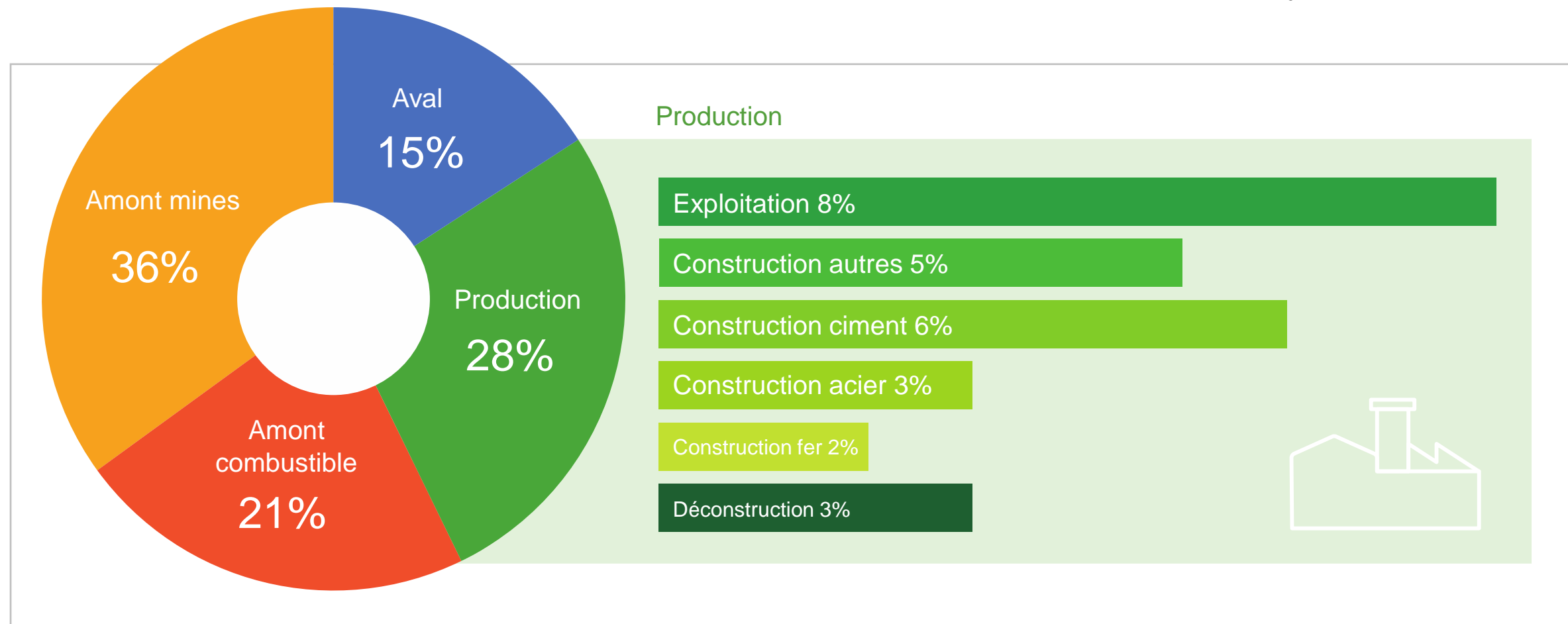


Titre à venir

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



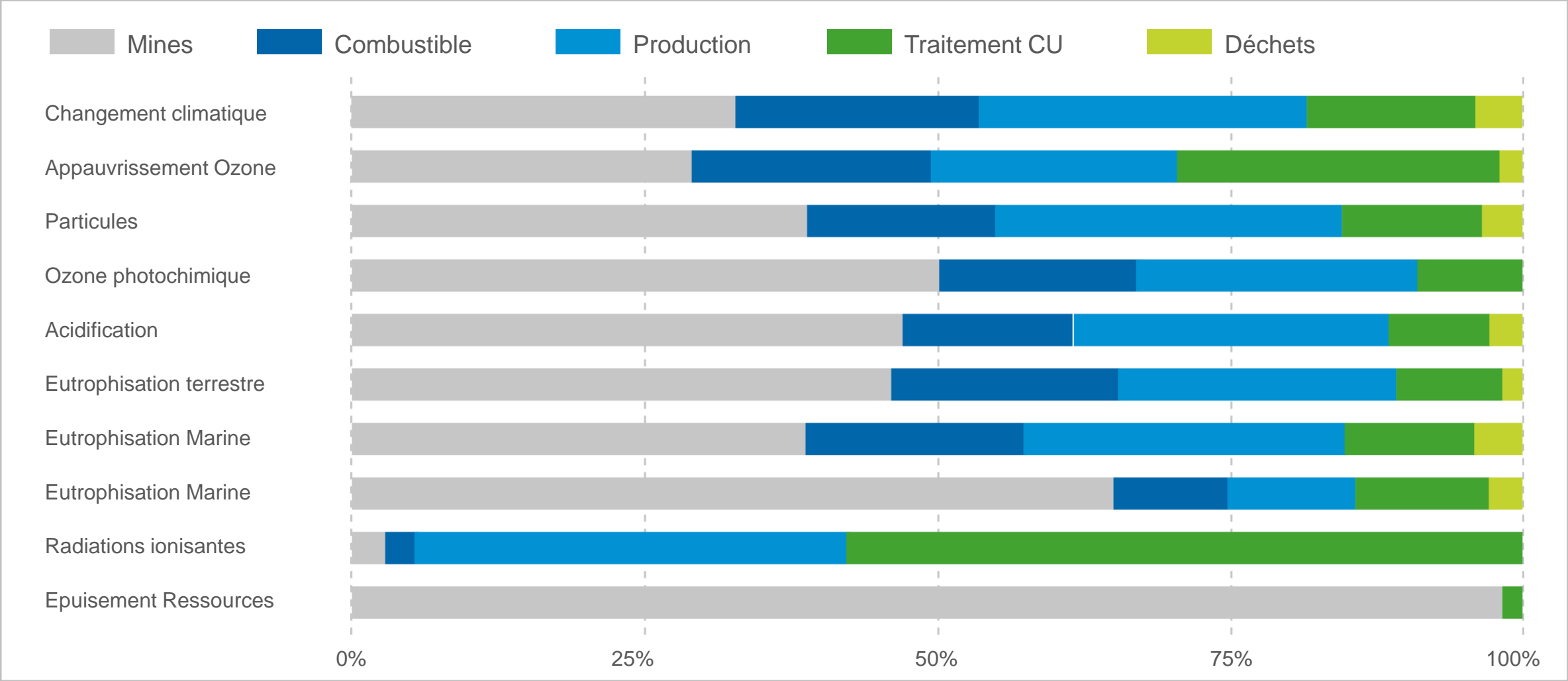
Les autres résultats

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
CO₂/kWh



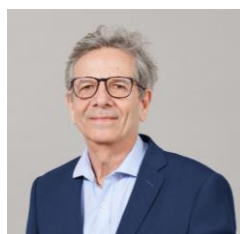
Production = construction + exploitation + maintenance

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 CO₂ 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 m³/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)

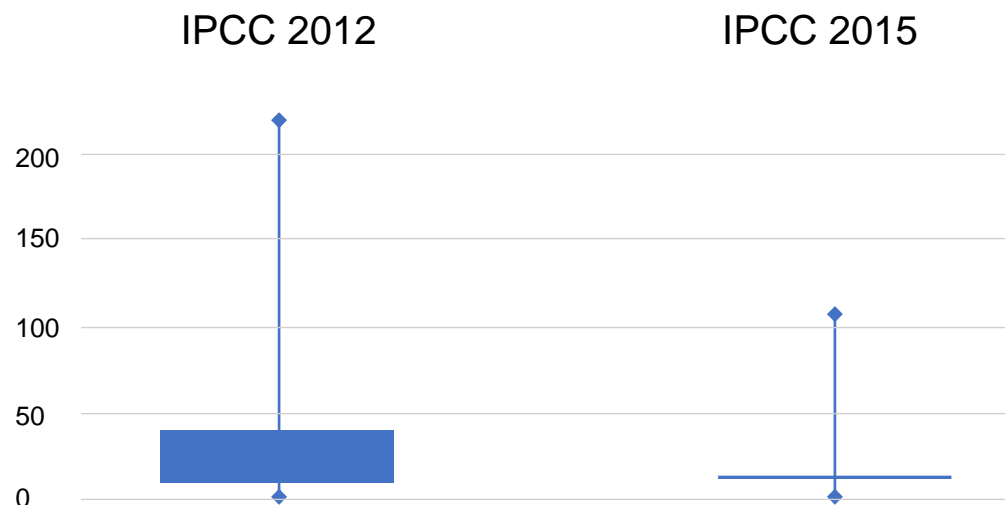
Radiations ionisantes :

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 CO₂/kWh

ACV France



6 g eq CO₂/kWh



Extrait d'une
version de la BDD
ACV

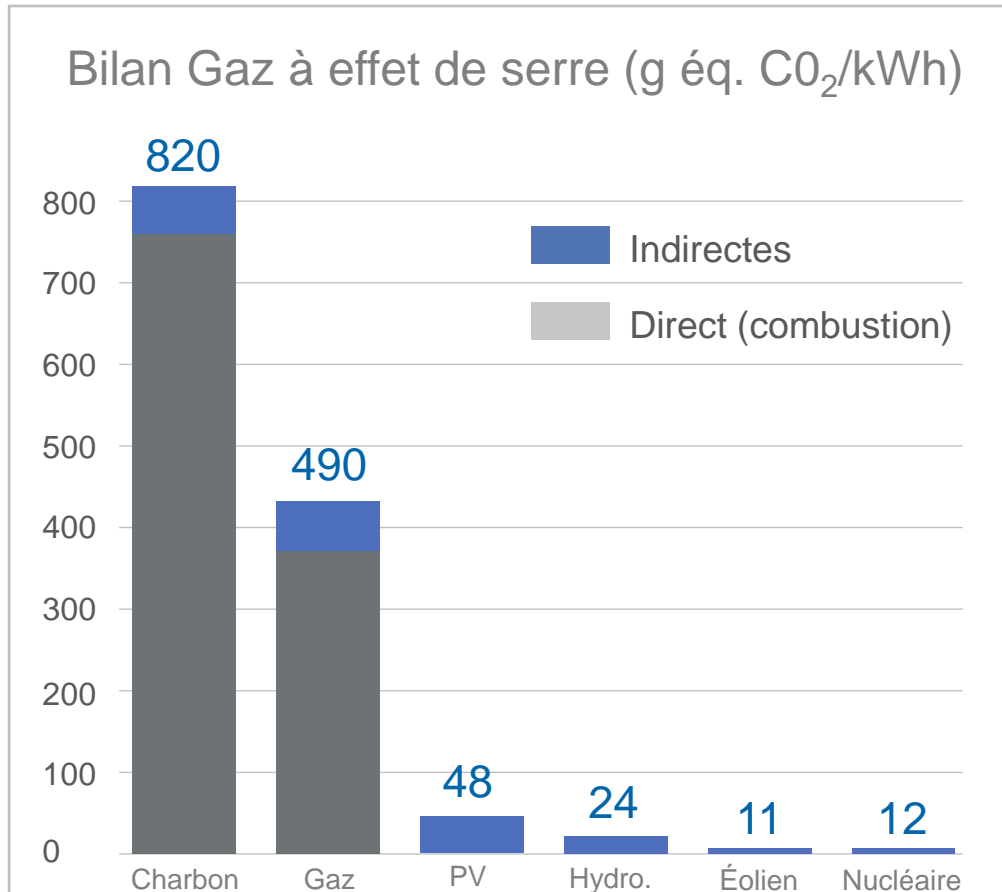


5 g eq CO₂/kWh



4 g eq CO₂/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 »





Merci